

## 第3章 地盤調査

### 3.1 ボーリング・土質試験

エレバン市の地質構造は、地質図や既存の 5,094 本のボーリングデータベースからその概略は把握できる。しかし地震動の増幅特性の評価に必要な S 波速度の情報および、液状化の判定に必要な土質に関する情報は不足していた。そこで、これらの情報を把握するため、市内 10 ヶ所で新たにボーリング調査を行い、ボーリング孔を利用していくつかの調査を行った。調査項目と数量を表 3.1-1 調査項目、数量に示す。

表 3.1-1 調査項目、数量

調査項目	数量
調査ボーリング	30m x 10
地下水位測定	10
標準貫入試験	129
攪乱試料採取	116
室内土質試験	116

新規ボーリング地点は、地震動の増幅特性に大きな影響を与え、また液状化危険度を左右する土質である、第四紀堆積物が分布する地域に重点的に配置した。既存情報からは、岩盤が市の北部で浅く南部では軟弱層が覆っていることが推測されたため、図 3.1-1 に示すように、新規ボーリング地点は市の南部に重点的に配置された。表 3.1-2 には各ボーリング地点の地表地質を示した。図 3.1-2 はボーリング柱状図のサンプルで、全柱状図は Data Book にまとめた。

表 3.1-2 ボーリング調査地点の表層地質

第四紀堆積物		
地質記号	時代	地点番号 (BH-)
apQ42	Modern Section (the upper part)	3
apQ41	Modern Section (the lower part)	1, 9
apQ2-3chr	Middle-to-Upper Quaternary Sections (the lower part)	2
apQ3ar	Upper Quaternary Section (the lower part)	4
laQ1-2	Lower-to-Middle Quaternary Sections	6, 10
Q1nb1	Lower Quaternary Section (the lower part)	7
第三紀堆積岩		
Pg3sh3	Lower-Middle Oligocene	5, 8



### 3.2 PS 検層

地盤のS波速度情報を得るために10箇所の新規ボーリング掘削孔でPS検層を実施した。PS検層は、ボーリング孔中に地震計を設置し、地表で起振したS波を孔中の各深度で受振して地盤のS波速度構造を把握する物理探査手法である。起振点から受振点までの距離を、起振時刻と受振時刻の時間差で割ってS波の伝搬速度を計算する。横波であるS波を発生させるためには、地上に大きな木板を設置してその端面を鉄製ハンマーで水平に強打する。左側面と右側面の2方向で起振し、受振した波形の位相が反転する箇所を、S波の到達時刻として読み取る。図3.2-1に2方向起振によるPS検層の記録例と起振の様子を示す。PS検層結果はData Bookにまとめて示す。

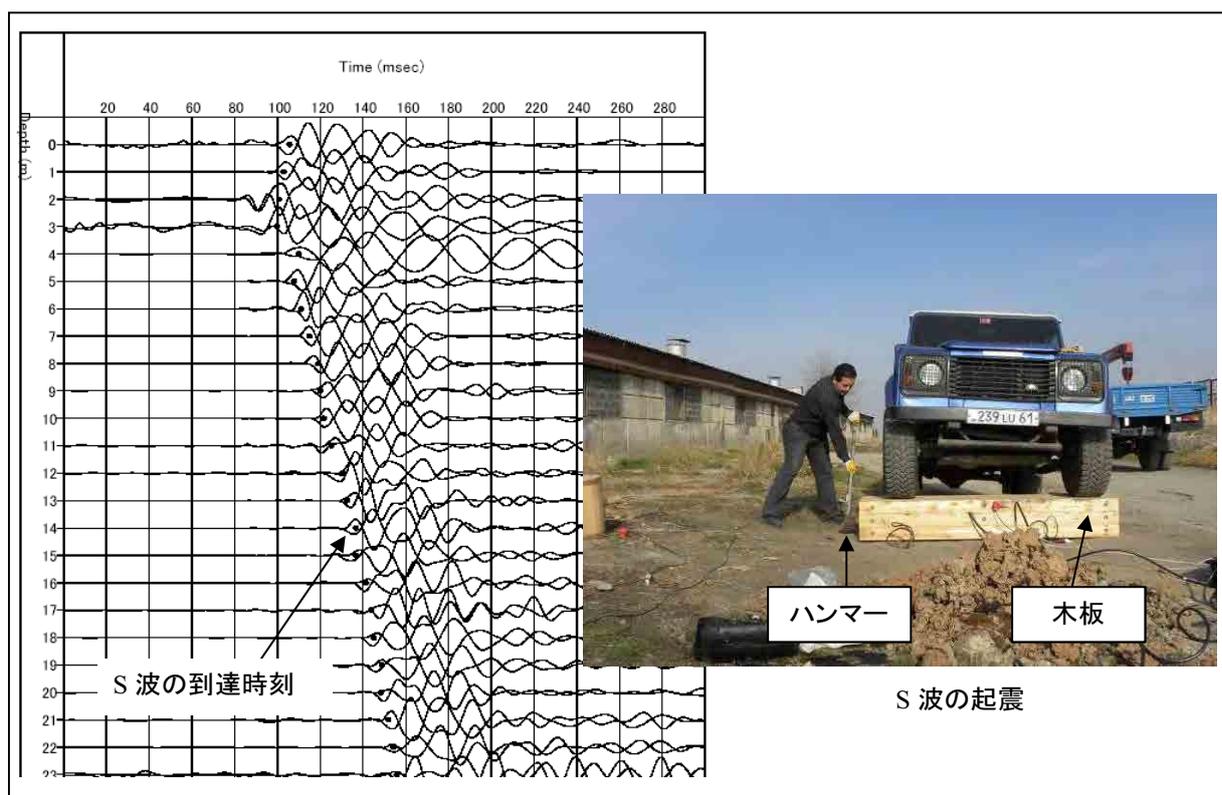


図 3.2-1 S波の起振の様子と測定記録例

### 3.3 表面波探査

地盤のS波速度情報を得るため、市内60箇所で表面波探査を実施した(図3.3-1)。表面波探査は、複数の地震計を地表に平面的な広がりを持って設置し、人工的に発生させた表面波や常時微動を同時に多点で測定、解析することにより、地下のS波速度構造を把握する物理探査手法である。この調査では24台の地震計をL字型に2m間隔で配置し、人工的に発生させた振動や常時微動を測定した(図3.3-2)。表面波探査では、地表で観測した波形を使って地下のS波速度構造を解析するので、直接地中のS波速度を測定する手法であるPS検層と比較するとやや精度が低い。しかし、PS検層は測定のためにボーリング孔を掘削する必要があるため、費用や簡便さに関しては表面波探査が有利である。

図3.3-3に、同じ箇所で実施した、表面波探査の結果とPS検層の結果との比較例を示す。表面波探査の解析結果は、直接S波速度を観測したPS検層結果と調和的である。10箇所の新規ボーリング地点全てで比較を

行ったが、いずれも同様の整合性が確認された。したがって、すくなくともエレバン市のような地盤では、表面波探査は地下のS波構造の把握に有用であることが確認された。調査結果は、Data Book にまとめて示した。

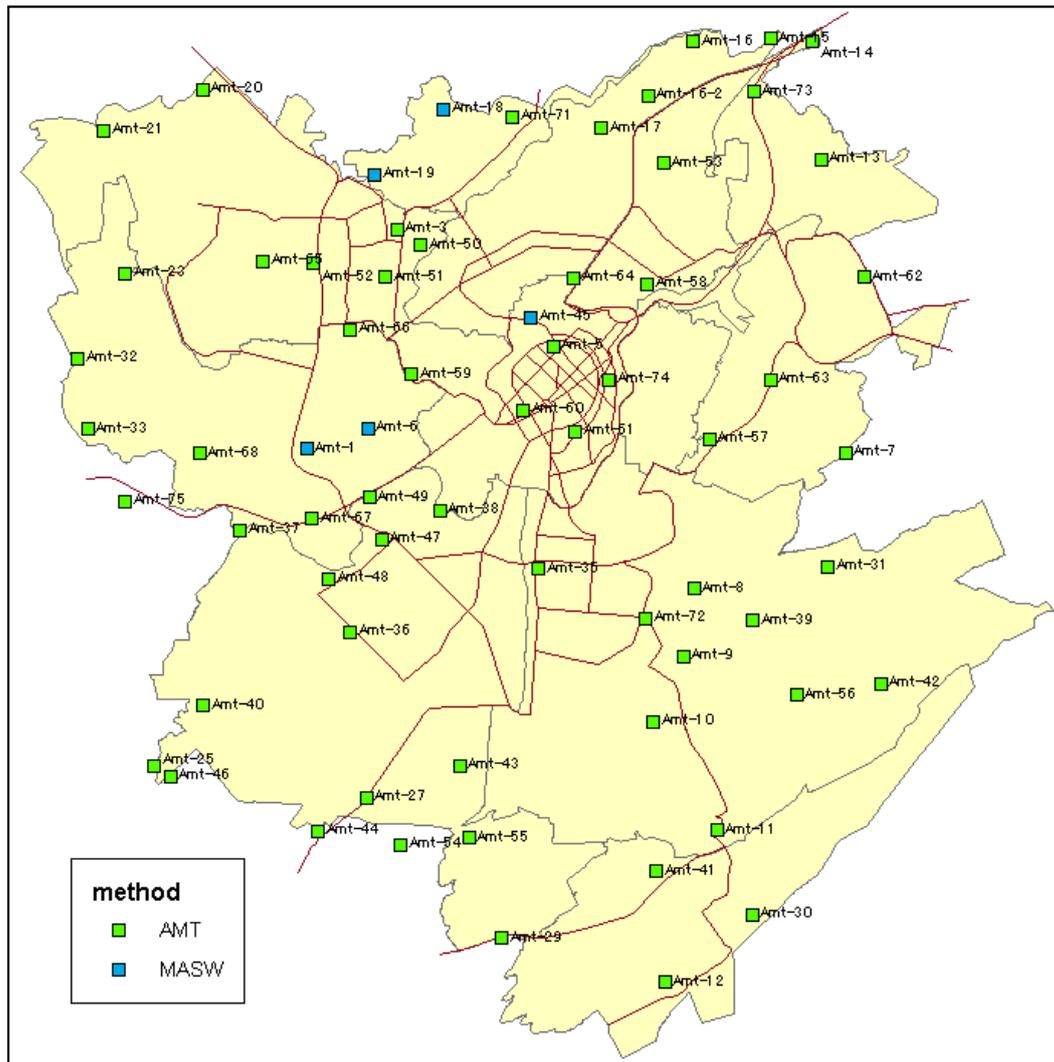


図 3.3-1 表面波探査実施地点



図 3.3-2 表面波探査のL字型地震計配置

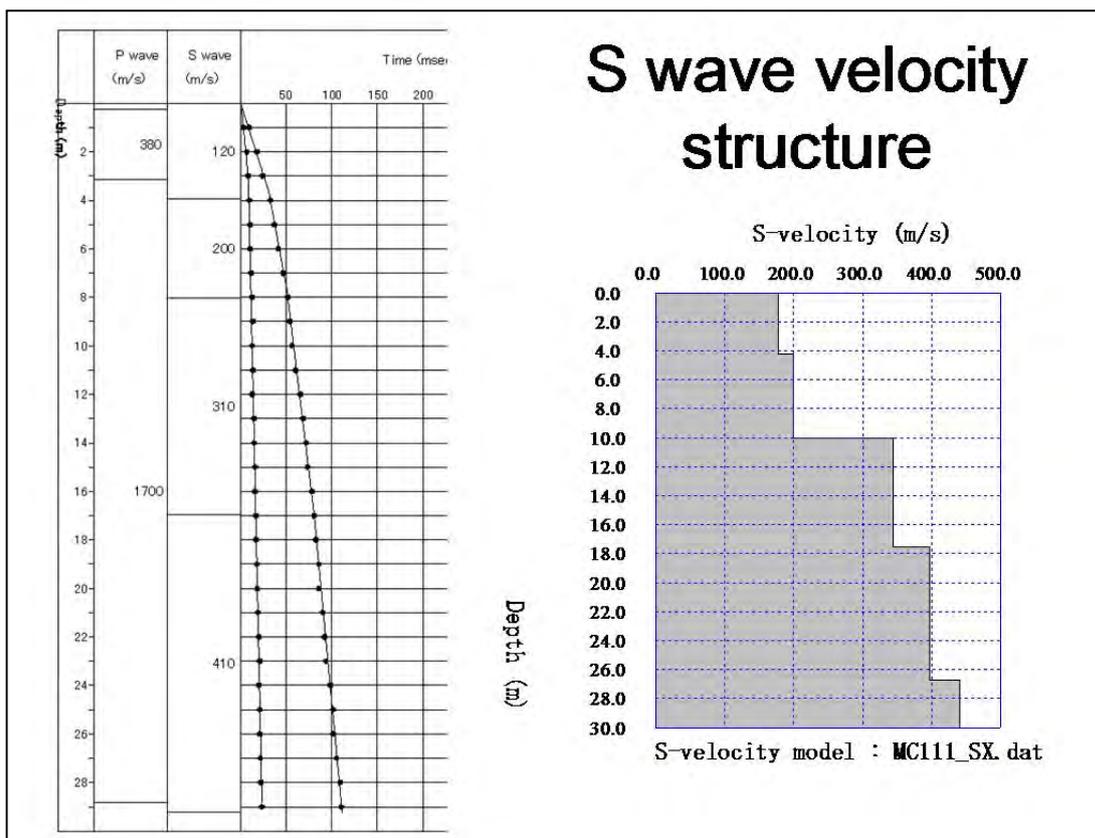


図 3.3-3 PS 検層結果(左)と表面波探査結果(右)の比較

### 3.4 常時微動探査

常時微動探査は、表面波探査実施地点と同じ場所で行った(図 3.3-1)。常時微動とは、遠くで発生した交通振動や工場の機械で発生した人工的な振動、あるいは潮汐や火山活動で発生した自然起源の振動が混じり合った、きわめて微小な振動のことである。常時微動は、地表や地中でいつでも観測することができる現象である。

観測された常時微動は、地中に存在する明瞭な S 波速度境界より浅層の地盤の物理的性質を反映しており、常時微動のスペクトルから S 波速度構造を推定することができる場合がある。H/V スペクトル(水平方向のスペクトルと垂直方向のスペクトルの比)は、水平方向のスペクトルよりも明瞭な結果を示すことが多いため、広く利用されている。この調査では、表面波探査で得られた S 波速度構造を H/V スペクトルを用いて検証した。結果の例を図 3.4-1 に示す。全解析結果は Data Book に示す。

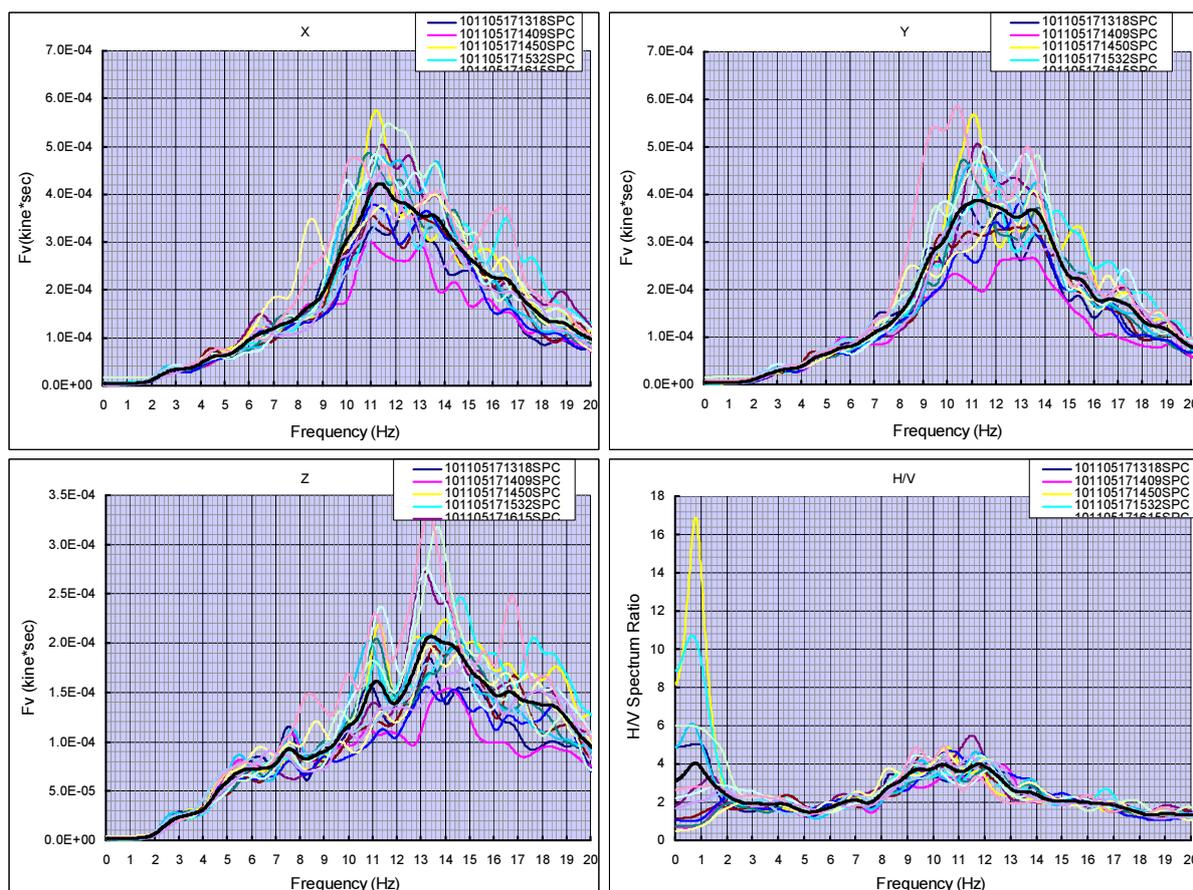


図 3.4-1 常時微動探査結果の例

### 3.5 表層地質図の作成

エレバン近郊の地質構造、テクトニクスや地質的な変化の歴史については、長年にわたって地質研究所、地質調査所などの研究機関、あるいは多くの研究者、たとえば A. Aslanyan, A. Gabrielyan, K. Paffenholtz, R. Arakelyan, S. Arzumanyan, A. Nazaryan などによって研究されてきた。1990年に実施された地震マイクロゾーニング調査では、Yu. Sayadyan と E. Kharazyan によってエレバン市の縮尺 1:10,000 の地質図 (Sayadyan and Kharazyan, 1990) が作成された。1993年には E. Kharazyan がエレバンとその周辺を含む縮尺 1:25,000 の地質図を作成した。2004年には Georisk が縮尺 1:10,000 でエレバン市の地質図を作成し、さらにこれを GIS 化した。

Georisk 社は多くの表層地質に関するデータを保有し、経験ある技術者を有するところから、この調査では表層地質図作成を Georisk 社に現地再委託して実施した。再委託した業務内容は、既存資料の収集、新たなボーリング資料の収集、分析および補足的な現地調査を行い、地震動増幅特性評価、地すべり評価のための地盤モデル作成のための表層地質図を作成するという内容である。

既存の地質学的調査、地質図としては主に Sayadyan and Kharazyan (1990)、Kharazyan (1993)および Georisk (2004)を使用した。これらの既存地質図を図 3.5-1 と図 3.5-2 に示す。



は南部の低地を対象とした水平縮尺 1:10,000、垂直縮尺 1:1,000 の 6 枚の図面である。これらの図面はすべて GIS データベース化された。作成した表層地質図の例を図 3.5-3～図 3.5-6 に示す。

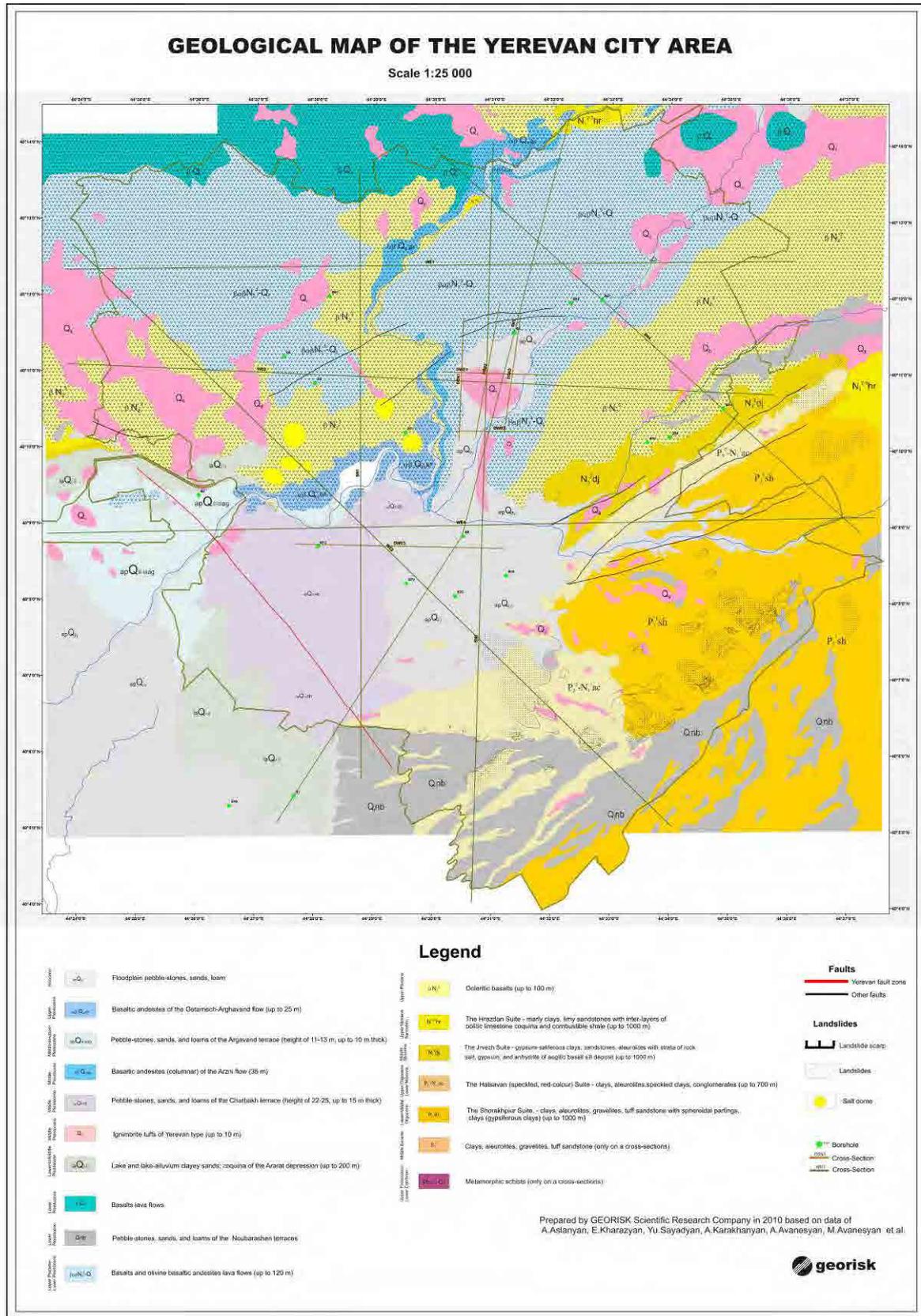


図 3.5-3 エレバン市の地質図

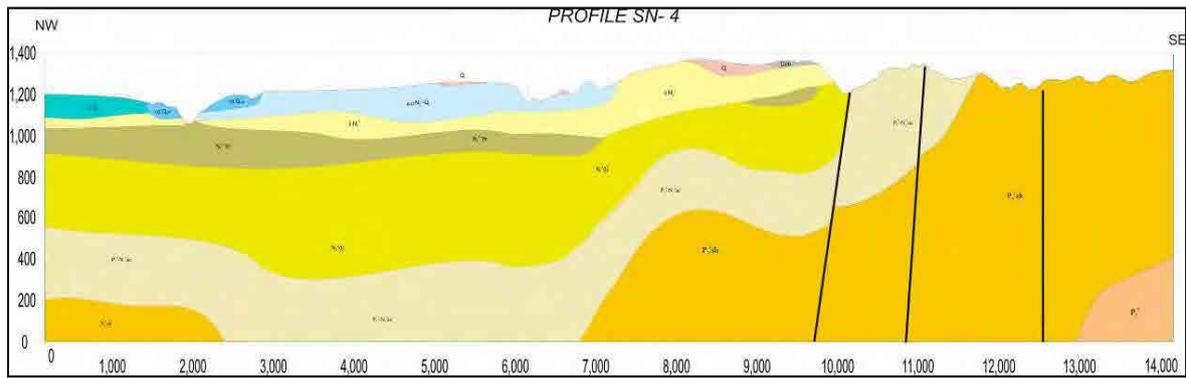


図 3.5-4 地質断面図の例 (南北断面 No.4)

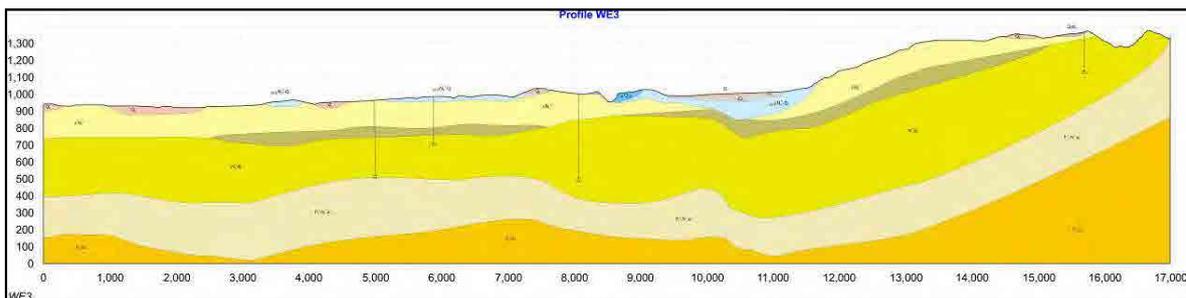


図 3.5-5 地質断面図の例 (東西断面 No.3)

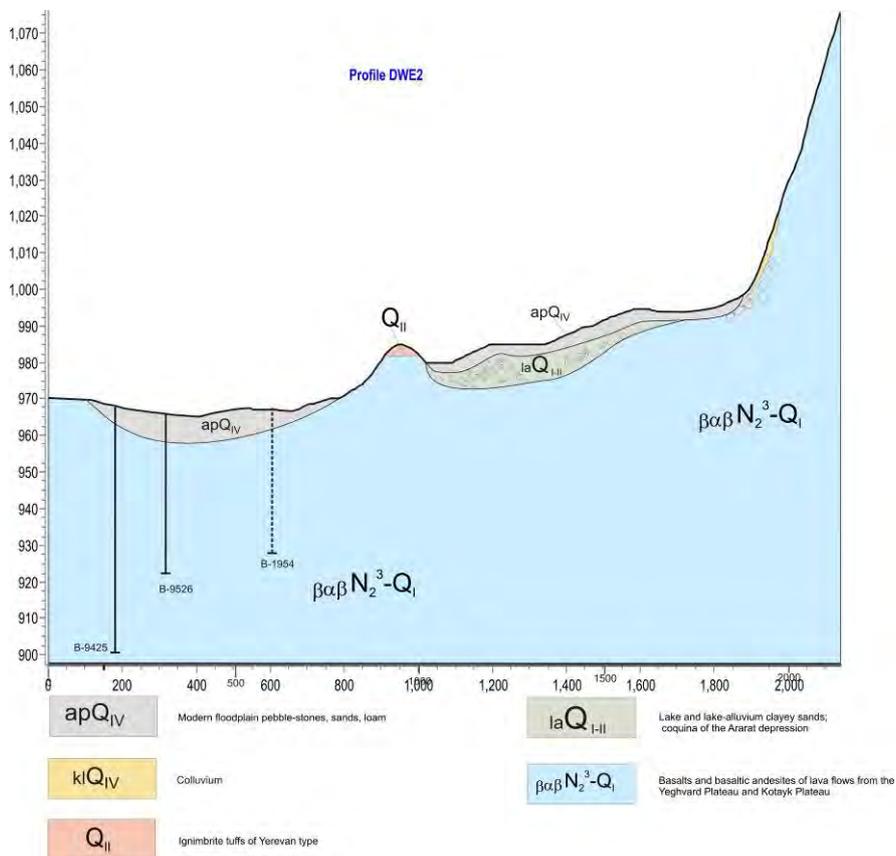


図 3.5-6 詳細地質断面図の例 (詳細東西断面 No.2)

表 3.5-1 エレバン市域に分布する地質の層序

地質時代		地層名	記号	説明	
第四紀	現世	氾濫堆積物	apQ <sub>IV</sub>	氾濫原堆積物、礫、砂、ローム	
	新期 更新世	Getamech-Argavand 溶岩	$\alpha\beta Q_{III}$ ga	玄武岩質安山岩 Getamech- Arghavand 溶岩 (厚さ 25 mまで)	
	中・新期 更新世	Argavand 段丘堆積物	apQ <sub>II-III</sub> ag	礫、砂、ローム Argavand 段丘 (高さ 11-13 m、厚さ 10 m)	
	中期 更新世	Arzni溶岩	$\alpha\beta Q_{II}$ ar	玄武岩質安山岩 (柱状) Arzni溶岩(35 m)	
		Charbakh 段丘堆積物	apQ <sub>II</sub> ch	礫、砂、ローム、 Charbakh 段丘 (高さ 22-25 m、厚さ 15 m まで)	
		Yerevan type 凝灰岩	Q <sub>II</sub>	凝灰岩 Yerevan type (厚さ 10 mまで)	
	前・中期 更新世	Ararat suite	laQ <sub>I-II</sub>	湖成層、沖積粘土、砂 (厚さ 200 mまで)	
	前期 更新世	Yeghvard plateau溶岩、 Kotayk plateau溶岩	$\beta Q_I$	玄武岩溶岩	
Nubarashen段丘堆積物		Q <sub>I</sub> nb	礫、砂、ローム (高さ180 m、厚さ 70 m まで)		
第三紀	新第三紀	前期更新世～ 新期鮮新世	Yeghvard plateau溶岩、 Kotayk plateau溶岩	$\beta-\alpha\beta N_2^3 -Q_I$	玄武岩、オリビン玄武岩質安山岩溶岩 (厚さ 120 mまで)
		新期鮮新世	ドレライト溶岩	$\beta N_2^3$	ドレライト溶岩 (厚さ 100 mまで)
		新期中新世	Hrazdan suite	N <sub>1</sub> <sup>2-3</sup> hr	マール質粘土、石灰質砂岩、石灰岩、頁岩
	古第三紀	中期中新世	Jrvezh suite	N <sub>1</sub> <sup>2</sup> dj	ジプサム、粘土、砂岩、aleurolite、augitic玄武岩 (厚さ1000mまで)
		前期中新世～ 新期漸新世	Hatsavan suite	P <sub>3</sub> <sup>2</sup> -N <sub>1</sub> <sup>1</sup> ac	粘土、aleurolite、粘土、礫岩 (厚さ 700mまで)
		前期漸新世	Shorakhpiur suite	P <sub>3</sub> <sup>1</sup> sh	粘土、aleurolite、粘土、礫岩、凝灰質砂岩 (厚さ 1000mまで)
		中期始新世	粘土、aleurolite、礫岩、凝灰岩、砂岩	P <sub>2</sub> <sup>2</sup>	粘土、aleurolite、粘土、礫岩、砂岩 (断面図のみに表示)
原生代から古生代	新期原生代～ 前期カンブリア紀	変成岩基礎	Pr <sub>3</sub> -C <sub>1</sub>	変成岩・片岩 (断面図のみに表示)	
		岩塩			

以下に、エレバン市に分布する地質を古いものから順に述べる。

(1) 古第三紀層

エレバン市域では、表層には現れないが、火山碎屑物の Voghjaberd suite が Kotayk 火山性台地や Yeghvard 火山性台地の溶岩の下にボーリングによって確認される。これは、エレバン市域の北東の Jrvezh 川峡谷に現れ、Voghjaberd 山地を形成する。この地質は、凝灰角礫岩、凝灰質礫岩、凝灰質砂岩、凝灰岩そして軽石－火山灰質のユニットとして現れる。

エレバン市南東の Shorakhpiur -Nubarashen 丘陵の主要な構造単位は、Shorakhpiur 背斜である。褶曲軸は、おおむね Shorakhpiur 村と Ghehadir 村をつなぐ線上にある。Shorakhpiur Suite (P<sub>3</sub><sup>1</sup>sh) は前期始新世-漸新世の堆積岩にあたり、アレウロライト、凝灰質砂岩、砂岩、gypsum 質粘土層とサンゴ礁石灰岩を挟む礫岩からなる。

## (2) 新第三紀層

東部の Nork Marash district と Jrvezh 村のすぐ南に、Shorakhpiur suite ( $P_3^1sh$ ) の上に、前期～中期中新世の Hatsavan suite ( $P_3^2-N_1^1ac$ ) と Jrvezh suite (Jr) が露出している。それらは未固結の礫岩、砂岩、赤色粘土、アレウロライト、Jrvezh suite ( $N_1^2dj$ ) では gypsum と岩塩からなる。Hatsavan suite は、Kanakaner 台地では砂質粘土、砂岩、岩塩と gypsum 層と挟みの層を伴うアルジライトを含む。

Hrazdan suite ( $N_1^{2-3}hr$ ) はエレバン市の北縁の Hrazdan 峡谷沿いに見られる。北部の台地を広く覆う溶岩の基盤をなして、マール、粘土層、石灰質砂岩などからなる。

北部の台地を構成するのは、ドレライト質玄武岩 ( $\beta N_2^3$ )、Yeghvard 溶岩台地と Kotayk 溶岩台地を構成する玄武岩と玄武岩質安山岩 ( $\beta-\alpha\beta N_2^3-Q_1$ ) である。

## (3) 第四紀更新統

Nubarashen 地区や Nor Kharberd 地区では、厚さ 40m に及ぶ円礫層、砂層、ロームからなる、前期第四紀の Nubarashen 段丘堆積物 ( $Q_{1nb}$ ) が分布する。上記の新第三紀層を覆い、連続性の良い平坦面を形成している。礫層の供給源はエレバン市外の北東部の山地 (Dzoraghbyur 山地) や古い火山が主である。

Kentron 地区から北部と東部の台地は、Yeghvard 火山性台地と Kotayk 火山性台地を構成する玄武岩および玄武岩質安山岩溶岩 ( $\beta Q_1$  と  $\beta-\alpha\beta N_2^3-Q_1$ ) に広く覆われる。玄武岩と玄武岩質安山岩は厚さが 150m に及ぶ。これらの溶岩の下位には、後期鮮新世の緻密な灰色と濃灰色のドレライト質玄武岩 ( $\beta N_2^3$ ) があり、それは平均の厚さが 20～30m になる。この玄武岩と玄武岩質安山岩は、極めて多量な一回の溶岩噴出によるものである。溶岩は Hrazdan 川峡谷、Getar 川峡谷および Jrvezh 川沿いに露出している。

角礫質の玄武岩質安山岩である Arzni 溶岩 ( $\alpha\beta Q_{1ar}$ ) と、石英を含む玄武岩質安山岩の柱状節理を持つ Getamech-Arghavand 溶岩 ( $\alpha\beta Q_{1mga}$ ) は Hrazdan 峡谷沿いに現れている。

Ararat 堆積平野の底部は、前期～中期第四紀の湖および湖近くの堆積層である Ararat 層 ( $laQ_{I-II}$ ) で埋められている。Ararat 層 ( $laQ_{I-II}$ ) は下部に湖の堆積物、礫、粘土が堆積し、その厚さは 180m から 200m になる。

Hrazdan 川峡谷の Argavand 段丘礫層 ( $apQ_{II-IIIag}$ ) は、西部郊外の Argavand 地区にあり、沖積面と段丘面の比高は 11～13m になっている。この段丘堆積物は円磨された小礫が主体で、マトリックスは礫、砂、粘土の混合である。

## (4) 現世堆積物

エレバン市域の中央部、南部に分布する沖積層は、Hrazdan 川、Jrvezh 川、Getar 川および Shorakhpiur 川の河床堆積物 ( $apQ_{IV}$ ) がある。これらの河川の河床や氾濫原堆積物は、小礫、砂礫、ローム質砂、粘土が中心で、これらの河川が Ararat 堆積盆地への流れ込むあたりに広く発達している。

### 3.6 地すべり調査

#### 3.6.1 調査の流れ

地すべり調査の流れを図 3.6-1 に示した。

地すべり分布に関しては、Georisk 社から多くの資料を提供された。また、JICA による開発調査「アルメニア国地すべり災害対策・管理計画調査」においても、アルメニア国全域の地すべり分布図を作成しており、その成果は報告書および GIS データとしてまとめられており、本調査でも活用した。ただし、それらの成果が作成されてから時間が経過していること、また、それらから得られた地すべり分布に経年変化が認められたので、本調査ではそれらの成果の検証をしつつ、最新の地すべりマップを作成し、地すべりのハザード・リスク評価を行った。また、地すべり写真判読には 2008 年撮影の衛星写真 (ALOS 画像) を用いた。

衛星写真によって地すべり地形を判読し、現地調査によって滑落崖、亀裂、段差、移動土塊等の状況を把握し、詳細な地すべり境界を確認し、地すべりマップを作成した。その成果をもとに、住宅、建物、インフラ等への影響を現地で確認し、地すべりリスク評価を行い、「地すべりハザード・リスクマップ」にまとめ、それを GIS によって整理した。

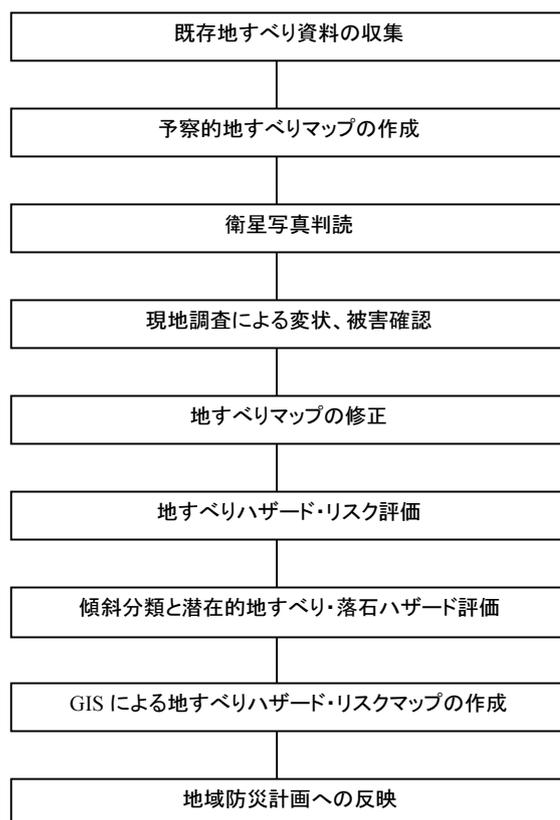


図 3.6-1 地すべり調査の流れ

#### 3.6.2 地すべりの地理的分布

エレバン市域での、地すべり分布は東南部の台地・丘陵地に集中している。Shorakhiur-Noubarashen 段丘の北・北西側の斜面は、段丘の開析斜面である。地すべり規模は、小規模なものは地すべり長さが

100m 未満、地すべり面積が 0.5ha、大きなものは地すべり長さが 1km 以上、地すべり面積が 1.5km<sup>2</sup> にもなる。特に大型の地すべりは Erebuni 地区東北部の Verin Jrashen と Erebuni 地区南部に存在する。

地すべりは、地質・岩相的に粘土質の地質、または地層がすべり面を発生させやすい物性を持つ所、地層の中にすべり面となるものが存在する所に発生する。主な地質-テクトニック要因で見ると、地すべり地域は次の 3 つのサブ区域に区分できる。

#### (1) Shorakhpiur-Nobarashen (Sovetashen) Landslide Group

長さ約 4km の範囲にわたって、南から北東山地に集中している。このグループの地すべりは、エレバン市外にも伸び、北東は Kotayk 州の Voghjaberd 村まで連続する。地質は Voghjaberd 層(ほとんどエレバン市外に分布)、Shorakhpiur 層、Hatzavan 層である。上部には Nubarashen 段丘堆積物が覆っているが、下部の地層の地すべりに引きずられて斜面の中部にまで落ちているところもしばしば見られる。この地すべりグループは、エレバンバイパス、Nubarashen 病院、Nubarashen 墓地、ごみ集積・処理場、Shorakhpiur 村周辺に分布する。

#### (2) Jrvezh Landslide Group

Nor Nork 地区に広がる Kotayk 火山性台地の開析斜面、Vardavar 湖から Jrvezh 村にかけての地域に分布するジプサム質粘土の露出する地域に分布する地すべりグループである。鮮新世のドレライト質玄武岩が洗い出され、粘土の凹凸のある表面が現れ、ドレライト質玄武岩の厚さは数 m から数 10m の範囲で変化する。すべり面を生成する粘土層は水分が多く、塑性流動しやすい。

#### (3) Hrazdan Landslide Group

Hrazdan 川の両岸で、粘土やマールの現れているサイト、厚い玄武岩溶岩が層状をなし、境界はいつも水で飽和しているところで発生するものである。玄武岩や玄武岩質安山岩だけでなく、粘土質層を覆っている残積性物質やクリープしている物質も、地すべりを起こしやすい。



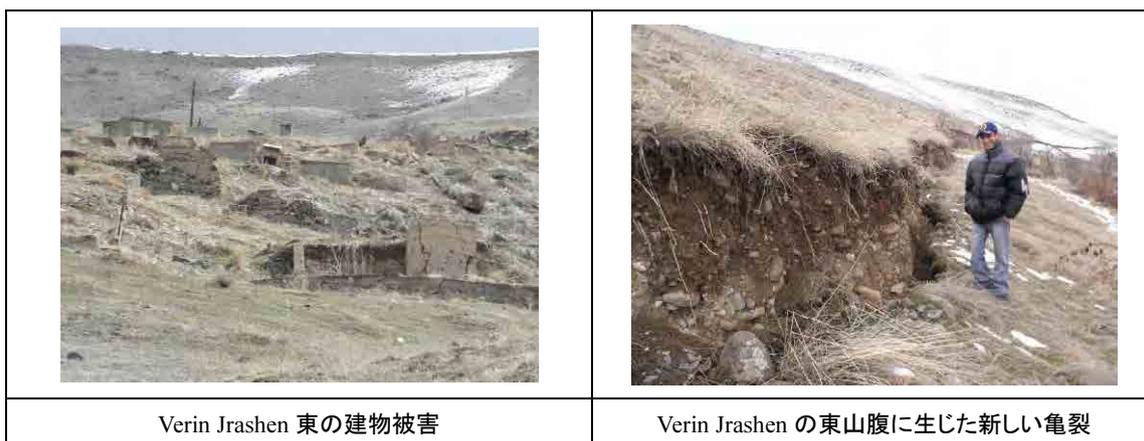


図 3.6-2 地すべり地の状況

### 3.7 活断層調査

#### 3.7.1 活断層調査の目的と調査内容

エレバン市のシナリオ地震を設定するために、エレバン市周辺の活断層について次の内容を検討する必要がある。

- 1) 活断層の詳細な位置
- 2) 断層のタイプ(横ずれ断層、逆断層、正断層)、長さ、傾斜方向・角度
- 3) 過去の活動履歴から推定される危険度の評価
- 4) 予測される地震の規模

活断層調査の内容は衛星写真判読、現地調査、トレンチ調査、および放射性同位元素を用いた年代測定からなる。アルメニアには Philip et al. (2001) による活断層図や Georisk により作成された活断層図がある。これらの活断層図の妥当性を衛星写真判読や現地調査によって検討した。

活断層の活動履歴は歴史地震の記録により検討される。しかし、歴史地震による被害の記録はあっても、その震源となった活断層を特定できない場合が多い。そのため、トレンチ調査を実施し、活断層の活動履歴を検討した。

衛星写真は日本の衛星「だいち」により撮影された ALOS とアメリカの CORONA を使用した。CORONA はほぼアルメニア全土をカバーし、ALOS はエレバン市周辺地域に限定される。衛星写真の ID ナンバーを表 3.7-1 および表 3.7-2 に示す。

表 3.7-1 衛星写真 ALOS の ID ナンバーと撮影年月日

前方視	後方視	撮影年月日
ALPSMF115712740	ALPSMB115712850	2008/3/27
ALPSMF115712735	ALPSMB115712845	2008/3/27
ALPSMF095582740	ALPSMB095582850	2007/11/10
ALPSMF176102735	ALPSMB176102845	2009/5/15

表 3.7-2 衛星写真 CORONA の ID ナンバーと撮影年月日

前方視	後方視	撮影年月日
DS1111-1082AF004	DS1111-1082AA010	1970/7/28
DS1111-1082AF005	DS1111-1082AA011	
DS1111-1082AF006	DS1111-1082AA012	
DS1111-1082AF007	DS1111-1082AA013	
DS1111-1082AF008	DS1111-1082AA014	
DS1111-1082AF009	DS1111-1082AA015	
DS1111-1082AF010	DS1111-1082AA016	

### 3.7.2 ガルニ断層とエレバン断層の活断層トレース

エレバン市周辺の活断層を図 3.7-1 に示した。本プロジェクトで実施したトレンチ箇所(North Garni、Yelpin、Nor Ughi)も同図中に示した。

#### (1) ガルニ断層

ガルニ断層は延長約 200km の活断層であり、GF1 から GF5 の 5 つのセグメントに区分される (Karakhanian et al., 2004; Georisk のガルニ断層に関する報告書)。エレバン市周辺には Abovyan から Garni までの GF2 セグメントと Garni から Yelpin までの GF3 セグメントが分布している。本プロジェクトではこれらの 2 セグメントをシナリオ地震の対象として詳しい調査を行った。

図 3.7-2 に Georisk が作成した Abovyan から Garni 村にかけてのガルニ断層の GF2 セグメントの詳細な活断層トレースを示す。これらの活断層図ではガルニ断層はたいへん明瞭な活断層トレースをもつ断層として表現されている。しかし、今回実施した衛星写真判読によると、活断層トレースは必ずしも明瞭ではない。低断層崖などの断層変位地形が明瞭なのはガルニ村北の山頂部だけである(図 3.7-3)。

ガルニ断層は Garni 村の南で東西方向にのびる深い峡谷を横切っており、南の崖に断層が露出している(図 3.7-4; 位置は図 3.7-2 参照)。この断層はガルニ断層であると推定されている。しかし、その上部の山頂部には低断層崖などの断層地形はみられない。すなわち、図 3.7-4 に示された断層が活断層であるかどうかは疑わしい。ガルニ断層の GF2 セグメントでは 1679 年に M7.0 のガルニ地震が発生しているが、断層地形がどこにも見当たらないことから、少なくともこの断層の地表に近い部分は、この地震で活動したようにはみえない。

図 3.7-5 に Yelpin におけるガルニ断層の GF3 セグメントの活断層トレースを示す。北東端の断層が主要なガルニ断層であり、その西側に A から D の小規模な断層が発達し、全体で幅 1km 程度の断層帯を形成している。Georisk のガルニ断層に関する報告書では、ガルニ断層の典型的な断層地形として図 3.7-6 に示される地形が報告されている。これは右横ずれ断層が右ステップすることにより、断層に挟まれた地域が沈降し、断層池が形成される典型的な例である。しかし、断層沿いに 3 地点でトレンチ調査を行ったが、ガルニ断層は確認されなかった。池はガルニ断層の活動で形成されたものではなかった。そのかわりに D の小断層が活断層であることが確認された。ガルニ断層はひとつの連続する主要な断層ではなく、短い断層が断続的に分布する幅 500m から 1km 程度の断層帯からなるものと推定される。

## (2) エレバン断層

エレバン断層の有無やその性質に関しては1950年代から議論がなされていた(Aslanyan, 1954, 1958; Gabrielyan, 1959, 1981 など)。アララト低地の形成に関連する断層として、アララト北東縁に活断層が推定され、これがエレバン断層と呼ばれていた。エレバン断層は、事前調査の段階では、エレバン市に最も近い活断層として注目されていたが、伏在断層であり、活断層調査は難しいと考えられ、活断層調査の対象とはされていなかった。

しかし、調査団の行った予備調査で、Nor Ughi 村において中生代の基盤岩が第四紀の堆積物に乗り上げている断層露頭が発見された。そこで、さらに断層露頭の近くでパイロット・トレンチ調査を実施し、活断層の存在が確認された。

Georisk によるエレバン断層についての文献を要約すると次のようになる。

Aslanyan(1954, 1958)および Gabrielyan(1959, 1981)は重力探査を実施し、エレバン市の南西に北西-南東方向にのびる高重力異常帯を発見した。その南西端と北東端に活断層を推定し、Parakar 北および南断層と呼んだ(図 3.7-1 中の太い赤色の実線)。これらはエレバン断層の中央セグメントをなす断層である。エレバン市の南東に位置する Dvin や Vedi には鉱泉や温泉沈殿物が認められる。これらはエレバン断層の活動による現象と考えられ、彼らはエレバン断層の南東延長を図 3.7-7 のように推定した。本プロジェクトで実施した Nor Ughi のパイロット・トレンチは Gabrielyan(1959, 1981)が推定した断層上に位置する。Georisk は深いボーリングデータを収集・整理し、高重力異常を示すところでは結晶片岩からなる基盤岩が浅い位置に分布していることを確認した。また、アララト盆地の構造から、エレバン断層の延長を最長で 33km 程度と推定している(Georisk のエレバン断層に関する報告書)。863 年と 893 年に古代アルメニアの首都であるドゥビンが大きな被害を受けた地震が起こっている(図 3.7-1)。その震源になった活断層はエレバン断層あるいはガルニ断層と考えられている。エレバン断層周辺で起こった中小地震のメカニズム解析によると、逆断層タイプの地震が卓越する(Tovmasyan, 2008)。

Nor Ughi と Jrashen 付近の ALOS 衛星写真を図 3.7-8 および図 3.7-9 に示した。Nofr Ughi 村の北の Vedi 断層で活断層が確認されたが、主たる断層は、段丘の上昇のためさらに南にあるものと推定された。Jrashen では  $10^{\circ}$  程度の傾斜で段丘が傾斜しており、これは段丘の変形とも考えられる。

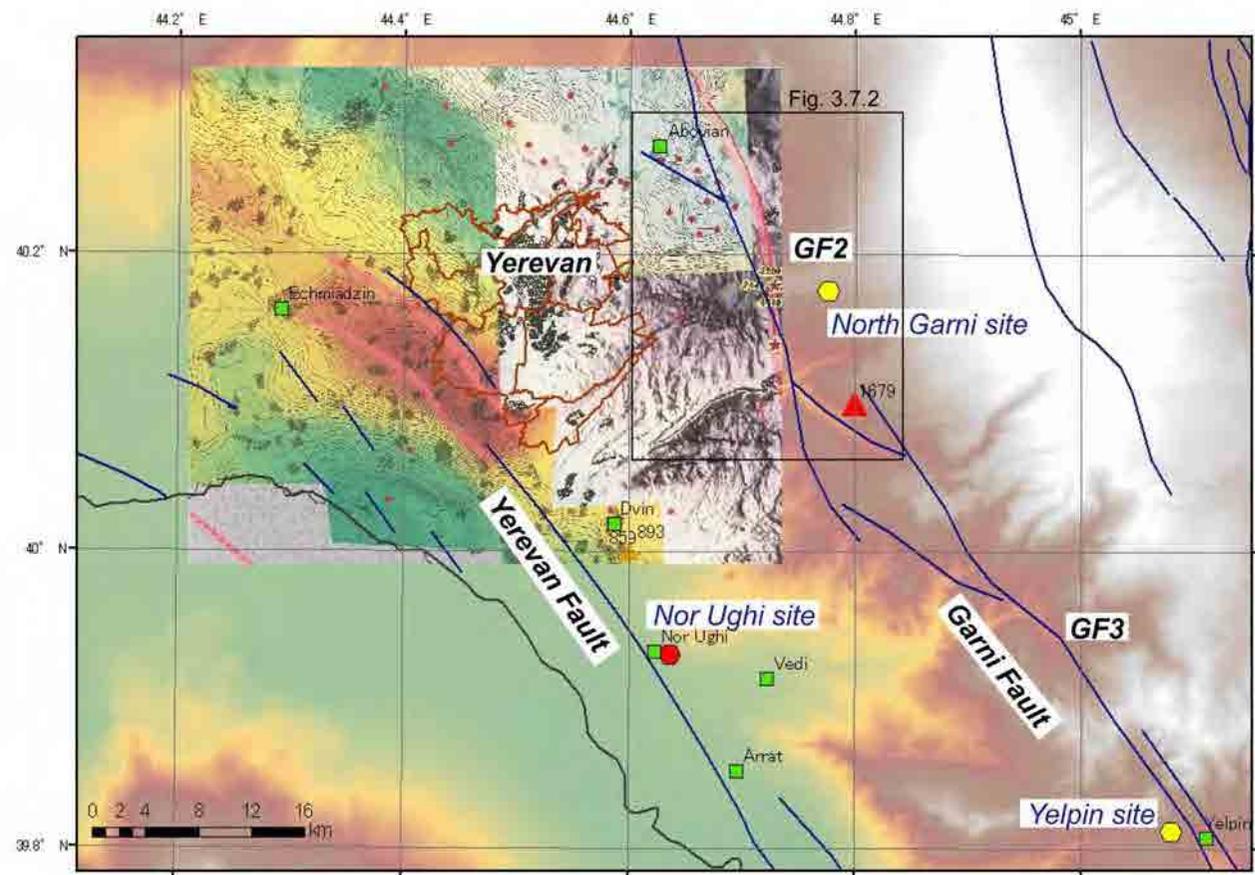


図 3.7-1 エレバン市周辺の活断層 エレバン市を含む地域は重力異常コンターが示されている。ガルニ断層は、エレバン市周辺ではGF2とGF3のセグメントが分布している。エレバン断層は高重力異常の北東端と南西端に推定され、南東方向にのびている。

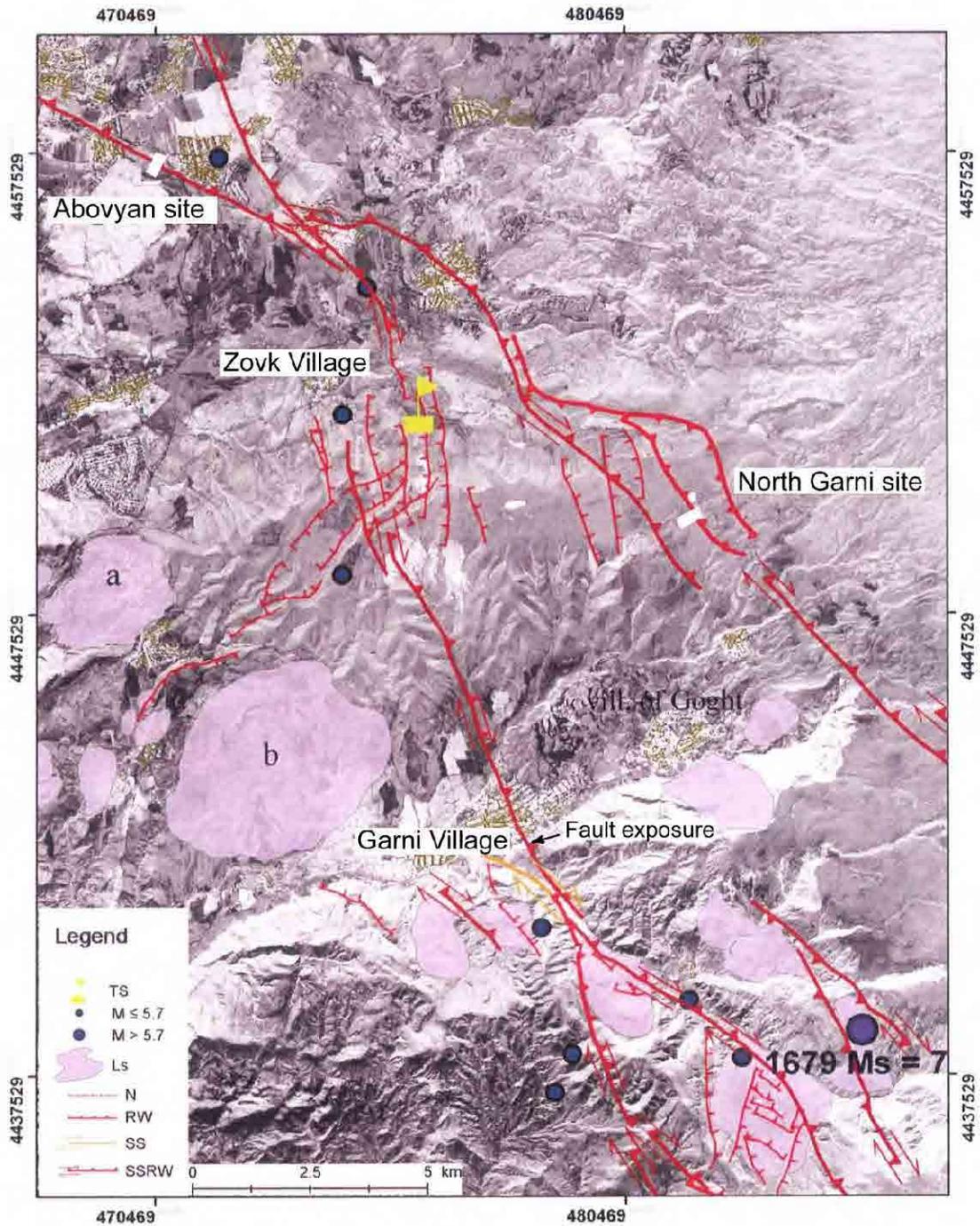


図 3.7-2 Abovyan から Garni へかけてのガルニ断層の GF2 セグメントの詳細な断層トレース (Georisk 資料) 図 3.7-1 には本図の太い実線だけが簡略化されて示されている。Abovyan 地点と North Garni 地点(白の長方形)は本プロジェクトで掘削したトレンチだが Abovyan 地点では活断層は確認されなかった。黄色の旗印は Georisk が掘削したトレンチの地点を示す。



図 3.7-3 Garni 村北方の山頂部にみられる活断層(白い破線) 少なくとも南北の5条の断層がみられる



図 3.7-4 Garni 村南の峡谷にみられるガルニ断層の露頭 露頭の位置は図 3.7-2 に示されている。断層は明瞭であるが、山頂部の地表に断層変位地形(低断層崖)はみられない

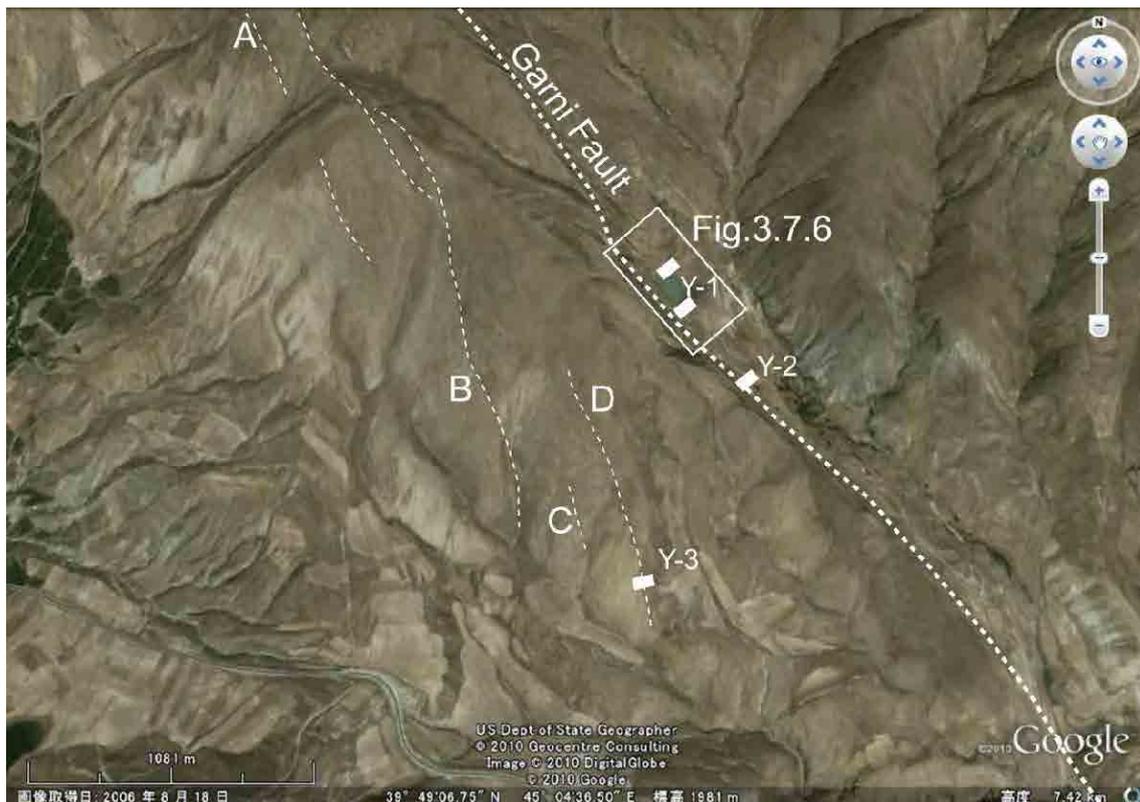


図 3.7-5 Yel'pin におけるガルニ断層の活断層トレース 太い波線がガルニ断層の主要な断層と考えられている。Y-1 および Y-2 地点で 3 箇所のトレンチを掘削したが、断層を確認できなかった。その西側には A から D の小断層が発達しており、Y-3 地点で断層が確認された。

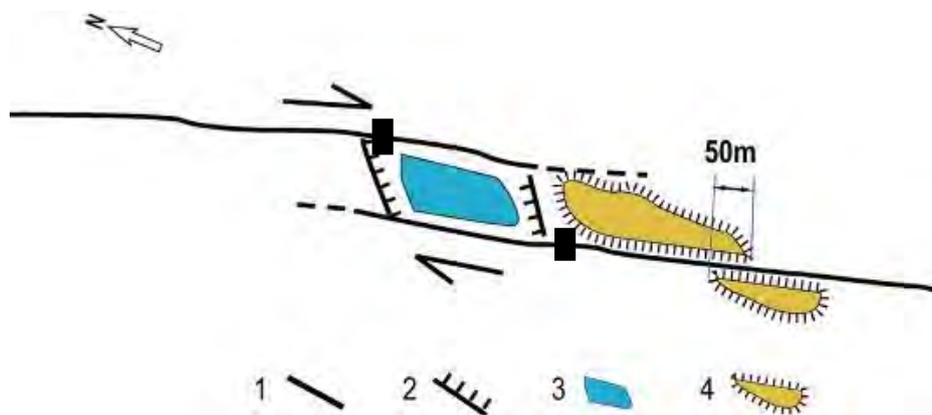


図 3.7-6 ガルニ断層の断層トレースとトレンチ調査位置(黒の長方形) 位置は図 3.7-5 に示されている。図は Georisk のガルニ断層に関する報告書による。水色は断層運動によって形成された断層池(Sag pond)と推定されていたが、活断層は確認されなかった。

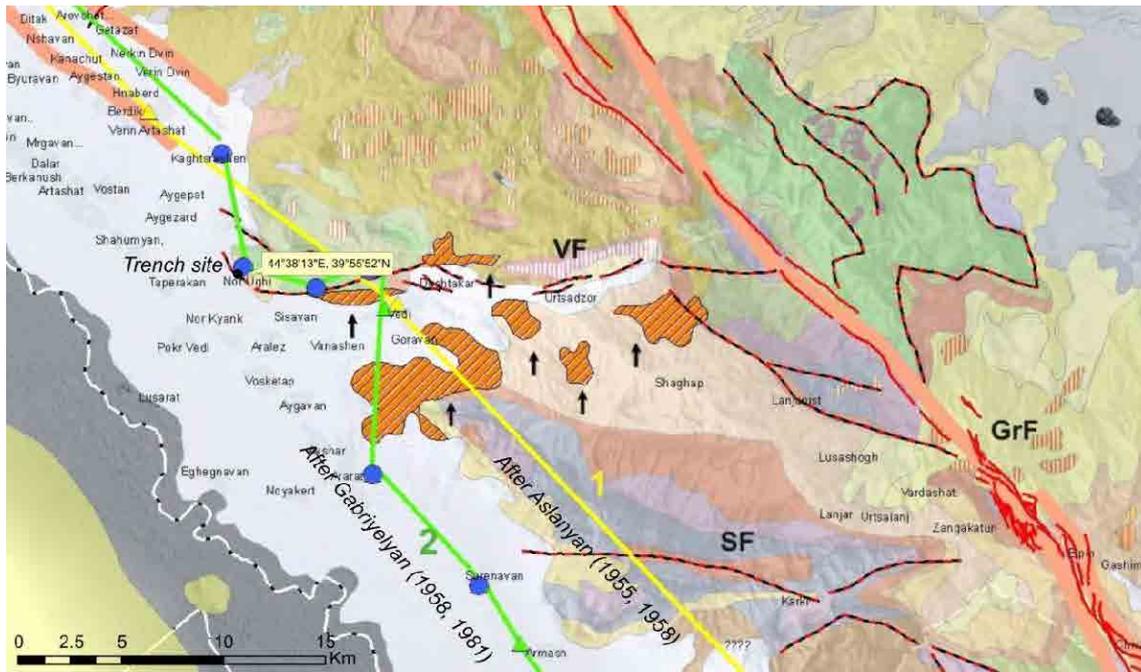


図 3.7-7 Aslanyan (1954, 1958) および Gabrielyan (1959, 1981) による Vedi と Ararat 付近(エレバン市の南東)のエレバン断層の活断層トレース 青色の丸は鉱泉の位置、矢印は温泉沈殿物が認められる場所を示す。Nor Ughi のパイロット・トレンチは Gabrielyan (1959, 1981) が推定した断層トレースの上に位置する。断層トレースはベディ断層(VF)とも重なっている。

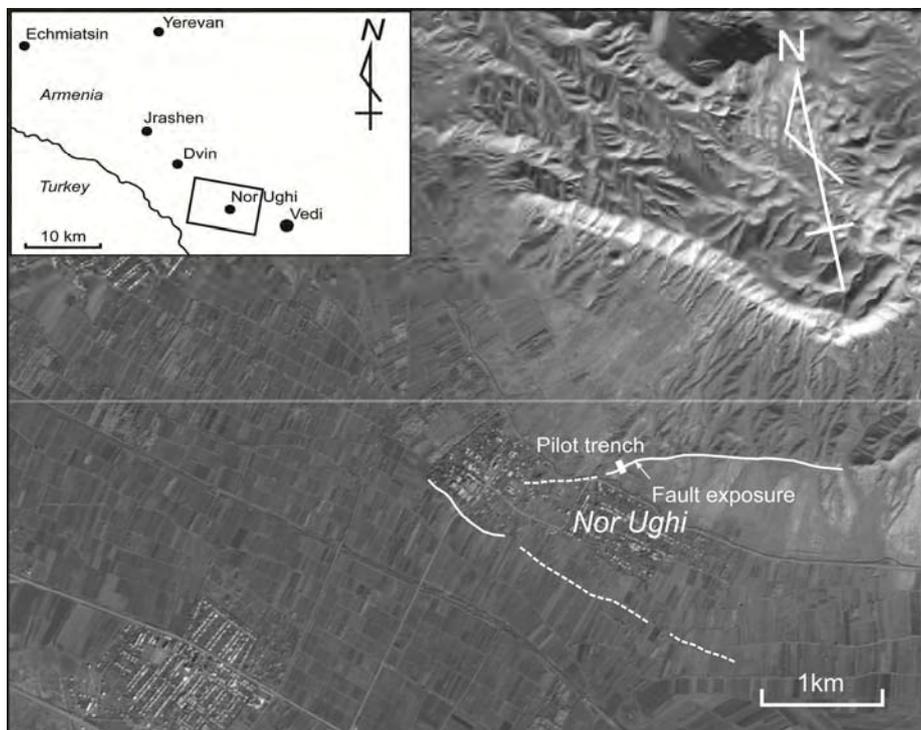


図 3.7-8 Nor Ughi における推定されたエレバン断層のトレース 背景は ALOS 衛星写真

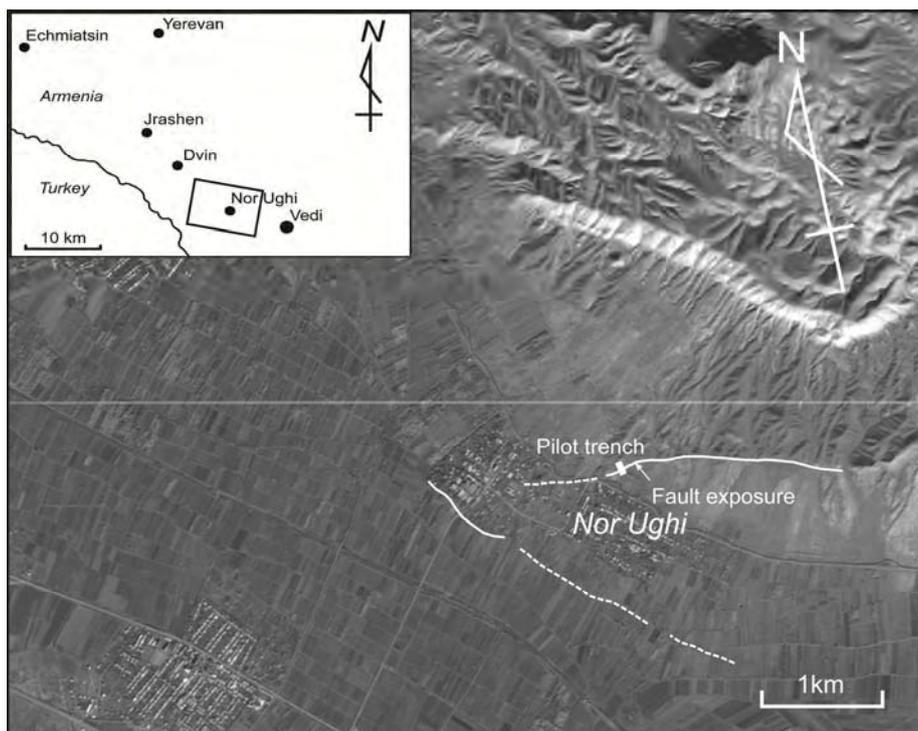


図 3.7-9 Jrashen における推定されたエレバン断層のトレース 背景は ALOS 衛星写真

### 3.7.3 トレンチ調査

#### (1) トレンチ調査の数量

まず、ガルニ断層を横切るトレンチを、Yelpin の Y-1 地点と Y-2 地点で実施した(図 3.7-5、図 3.7-6 参照)が、活断層は確認できなかった。Georisk の報告書によると、ガルニ断層は Yelpin 付近では主要な断層と A~D の副次的な断層からなるとされている。しかし、衛星写真を再検討したところ、ガルニ断層には主要な断層は存在せず、複数の短い断層が断続的に分布し、幅 0.5~1km の断層帯を形成しているという見解に至った。そこで、A~D の副次的な断層を含めてトレンチ地点を選定し、エルピンの Y-3 地点で断層を確認することができた。

Abovyan でのトレンチも推測された主要断層上で掘削されたが、やはり断層は確認されず、副次的な断層と考えられた North Garni 地点で断層が確認できた。ガルニ断層に主要断層が存在するか否かは、ガルニ断層の性状を考えるうえで重要な課題である。今後、Georisk の活断層図が修正されることを期待する。

エレバン断層については、当初伏在断層と考えられていた。しかし、予備的な現地調査およびエレバン断層の近くにある Vedi 断層を横切る Nor Ughi 地点でのパイロット・トレンチ調査の結果、活断層が確認された。

表 3.7-3 にトレンチ調査の実施数量を示す。

表 3.7-3 トレンチ調査の実施数量

断層		地点	箇所数	備考
ガルニ断層	GF2	Abovyan North Garni	2	North Garni で GF2 を確認
	GF3	Yelpin	4	Y-3 地点で GF3 を確認
エレバン断層近くの Vedi 断層		Nor Ughi	1	パイロット・トレンチ

## (2) ガルニ断層のトレンチ調査

ガルニ断層は Yelpin と North Garni の 2 地点で確認された。ここではこれらのトレンチについて述べる。

## 1) 正断層の地層の変形と堆積物の特徴

ガルニ断層のトレンチでは典型的な正断層を示す地層の変形や堆積物が観察された。最初に正断層における地層の変形と堆積物の特徴を述べる。

図 3.7-10 に正断層による地層の変形を示す。(A)は深部ほど断層の傾斜が緩くなる“リストリック”な正断層の上盤の変形を示している。上盤がずり落ちると断層崖基部に開口割れ目が形成され、上盤側の地層が落ち込む。リストリックな断層ではなくても、一般に正断層の断層面は一様でなく、凹凸があるので、上盤側がずり下がることにより開口割れ目が形成される。(B)は正断層における断層崖の特徴を示している。b が開口割れ目による上盤側の地層の変形で、c は上盤側に断層が形成され、Fissure-filled deposit が形成されている。日本ではこれを V 字状の落ち込み構造と呼ぶ。(C)は 2 つの V 字状落ち込み構造の形成過程が模式的に示されている。

図 3.7-11 に“Colluvial wedge”の形成過程を示す。A は地震直後における断層崖の形状を示す。B は断層崖が崩落し、“Colluvial wedge”が崖の基部に堆積している(Gsx の部分)。その後、崖の浸食作用により、細粒な堆積物が“Colluvial wedge”を覆う。“Colluvial wedge”は地震イベント直後に形成されるので、イベント層準とみなされる。その堆積時期がわかれば地震の年代が明らかになる。

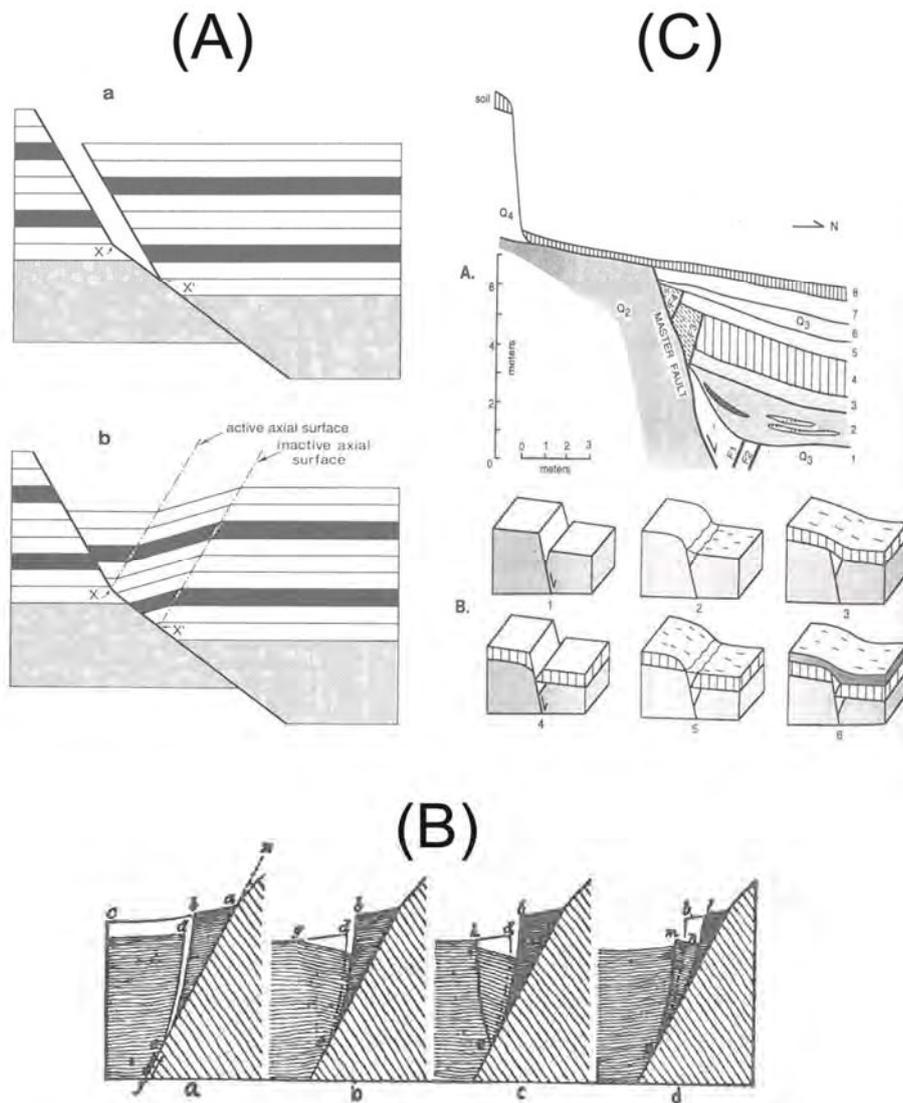


図 3.7-10 正断層による地層の変形 (A): 深部で断層の傾斜角度が緩くなると、断層が開口し、上盤が下盤に落ち込み、上盤の地層が変形する(Xiao and Suppe, 1992)、(B): 正断層による地層の変形の図解(Gilbert, 1890)、(C): Fissure-filled wedges の形成(Wang and Deng, 1988)。

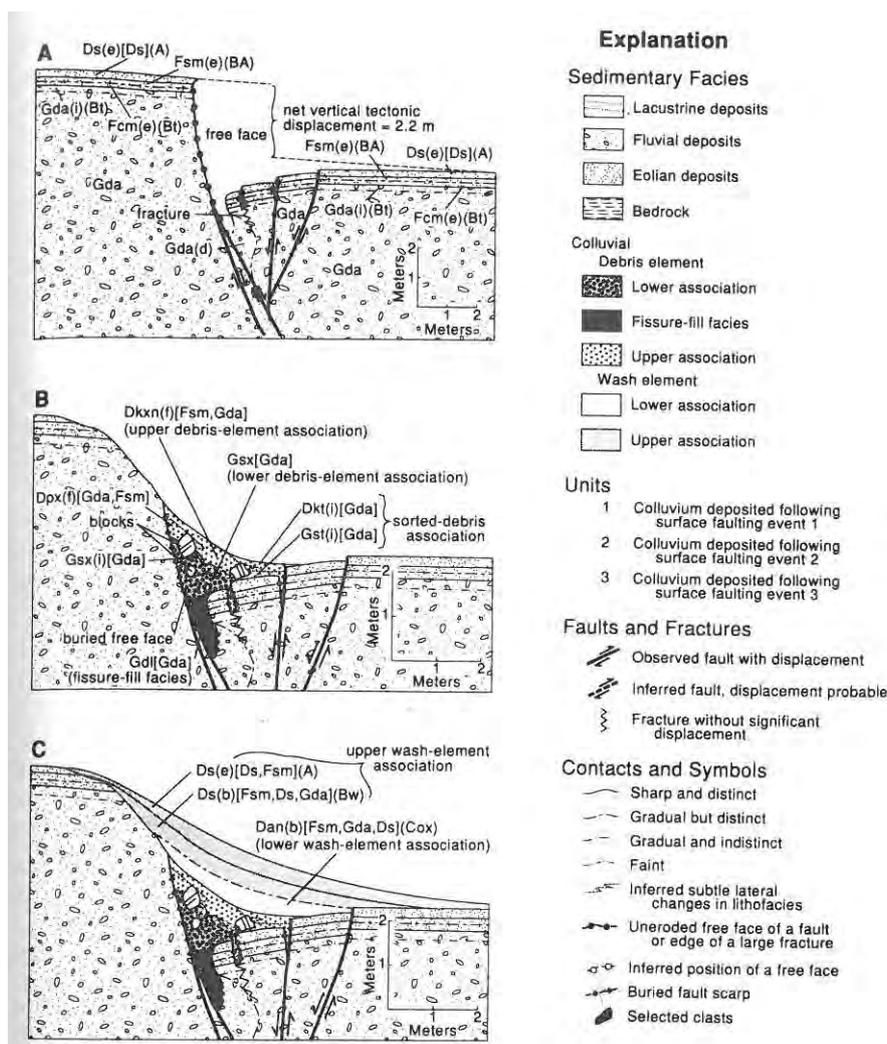


図 3.7-11 Colluvial wedge の形成過程 (Nelson, 1992)

2) North Garni 地点のトレンチ調査

ア. トレンチ地点周辺の地形

North Garni 地点の位置は図 3.7-2 および図 3.7-3 に示されている。図 3.7-12 および図 3.7-13 にトレンチ地点周辺の地形を示す。Garni 村北方の山頂部は段丘のような平坦な地形が発達している。この平坦面の形成時期は明らかでないが、平坦面上に北北西-南南東方向にのびる高さ 4~5m の直線的な低崖が発達している(図 3.7-12)。西側・低下側の平坦面は水平ないし東側(低崖側)にやや傾斜している(図 3.7-13)。この地域の地形は一般に東側から西側に標高を下げていくので、東側に傾斜した平坦面は逆方向への傾斜であり、断層運動による平坦面の傾動(back-tilting)と推測される。直線的な低崖および平坦面の傾動から低崖は低断層崖と推定される。

イ. トレンチで確認された層序とその <sup>14</sup>C 年代

断層崖を横切るように、長さ 10m、幅 2m、深さ 2~2.2m のトレンチを掘削した。図 3.7-14~図 3.7-17 に南側壁面および北側壁面のスケッチとモザイク写真を示す。また、表 3.7-4 に <sup>14</sup>C 年代測定結果を示す。文中の <sup>14</sup>C 年代は 2σ (95% 確率) の誤差による暦年代を示す。

トレンチの地層は A 層から F 層に区分される。

**A層**: 黒味を帯びた砂・礫混じりの粘性土からなる。有機質土を挟む。下位のB層とともに、断層崖の地層が浸食され、土砂が運搬され、堆積した地層である。図 3.7-11 の wash-element に分類される地層である。土器の破片が含まれる。堆積構造が乱されているので、古い耕作土であるかもしれない。GS-1、GS-2、GN-3、およびGN-5の年代測定が行われているが、下位のD層より古い年代を示す。古い炭化物が再堆積したものと思われる。

**B層**: 灰白色を呈する砂質シルトからなる。A層と同様に断層崖の地層が浸食され、運搬・堆積した地層である。

**C層**: 未固結な礫層からなる。最大径約 20cm の礫を含む。いわゆる“colluvial wedge”であり、断層崖の崩落により堆積した地層である。南側壁面が典型的な“colluvial wedge”を示す。北側壁面は断層崖の崩落だけでなく、より上部の斜面が崩壊し、“colluvial wedge”との境界が不鮮明になっているように見える。本層は断層崖に近いところから遠くへ順次堆積したものと考えられ、断層崖に近いほど地震直後の年代を示す。断層崖に近い南側壁面の GS-4 は BC1420-1260、GS-5 は BC1930-1740 の年代を示す。

**D層**: V字状の落ち込み構造の地層である。砂、シルト、割れ目を充填した有機質土などからなる。地層は東側に傾斜した断層とほぼ平行な構造を示し、東側へ急傾斜している(図 3.7-18)。南側壁面の GS-6 は BC1460-1310 の年代を示す。これはC層のGS-4 とほぼ同じ年代である。北側壁面では断層近くに割れ目を充填した有機質土がみられる(図 3.7-16、図 3.7-17)。その年代はGN-1 で BC1120-1000、GN-2 で BC1380-1260 を示す。

**E層**: 灰色を呈する砂層からなる。やや固結している。風成のローム層と考えられ、ラミナがみられる。GS-3 は BC5310-5220 の古い年代を示す。

**F層**: やや強く固結した礫層である。最大径 20cm の礫を含む。

#### ウ. トレンチで確認された断層

スケッチに示すように西へ急傾斜した断層と東側へ 50° ~60° 傾斜した数条の断層からなる。これらの断層により V字状の落ち込み構造が形成されている。西側に急傾斜した断層がメインの断層であり、断層崖を形成している。下盤が隆起し、上盤が沈降しているので、メインの断層は正断層である。

#### エ. 地震イベントの時期

トレンチでは1回の地震イベントが推定される。D層およびE層は地震発生前の表層堆積物であり、F層の礫層を覆っていた。地震発生と同時に断層の東側が隆起し、断層崖が形成された。同時に、その基部に開口割れ目が生じ、表層堆積物が落ち込み、D層のV字状落ち込み構造が形成された。その後、断層崖は崩落し、C層の“colluvial wedge”が堆積した。断層崖は引き続き浸食され、A層およびB層が堆積した。

以上の堆積過程から、イベントの時期はD層堆積後、C層堆積前と推定される。D層は地震が発生する直前の表層堆積物であり、その年代の直後に地震が起こったものと推測される。北側壁面の crack-filled deposit は開口割れ目を表層の炭化物が充填したものと推定される。これらのことからイベントの時期は BC1000 年頃と推定される(図 3.7-19)。

#### オ. 変位量

図 3.7-20 に 1 回の断層運動による変位量を示す。断層の下盤側は浸食されており、断層崖上部に D 層および E 層は分布していないので、変位量を直接推定することはできない。そのため、変位量は 1.4m 以上と推定される。“colluvial wedge”は断層崖の崩落により形成される。断層崖の高さは少なくとも“colluvial wedge”の厚さの約 2 倍と推定されている (McCalpin edited, 1996)。“colluvial wedge”の厚さは約 90cm であるので、変位量は約 1.8m と推定される。

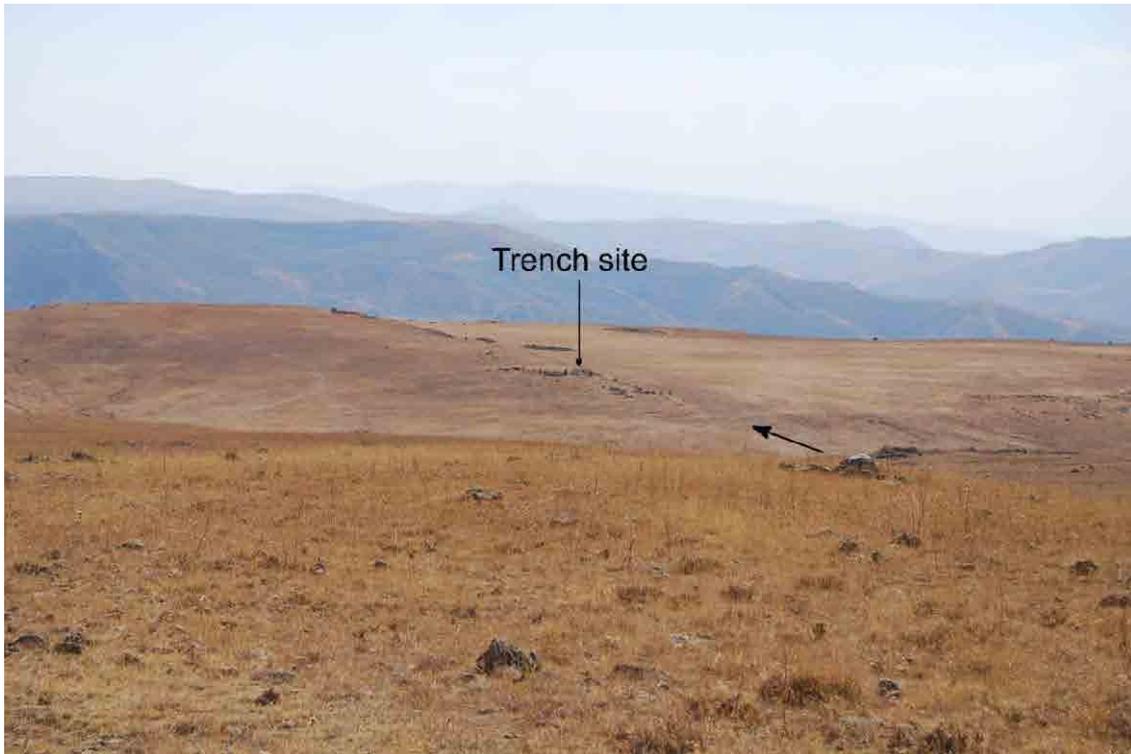


図 3.7-12 North Garni 地点の地形 矢印が断層であり、高さ 4~5m の低断層崖が明瞭である。北から南を眺める。

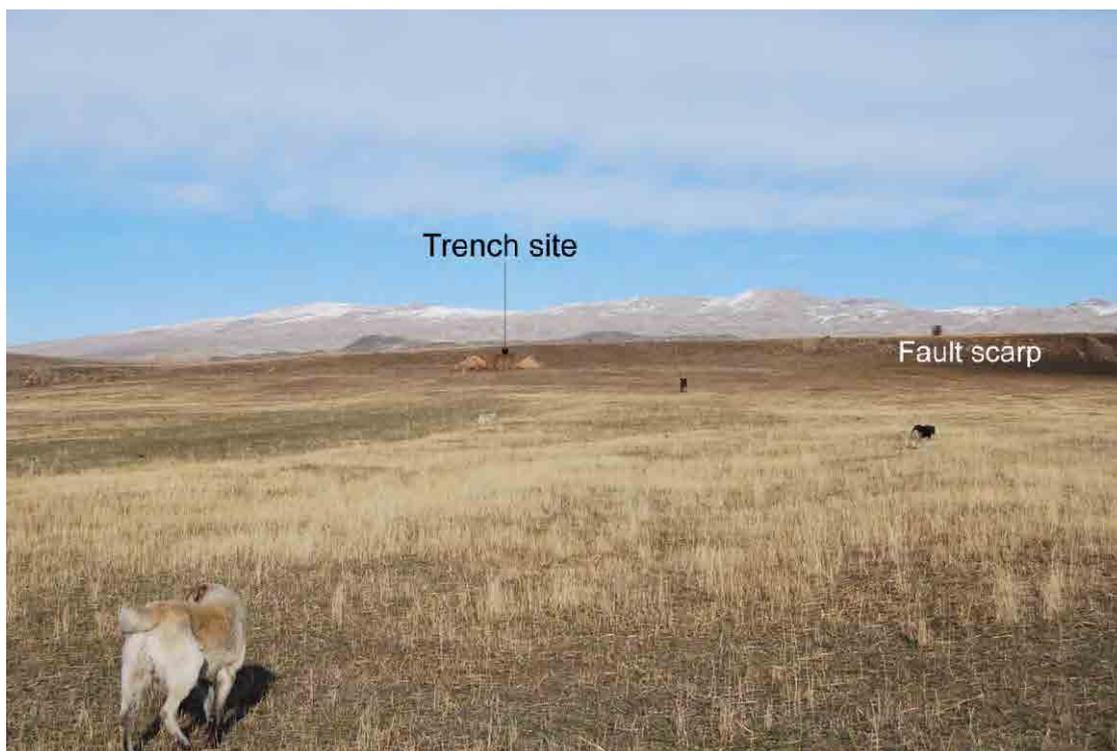


図 3.7-13 低断層崖を西から眺める 低断層崖から手前の平坦面は水平ないし東側・低断層側にやや傾斜している。

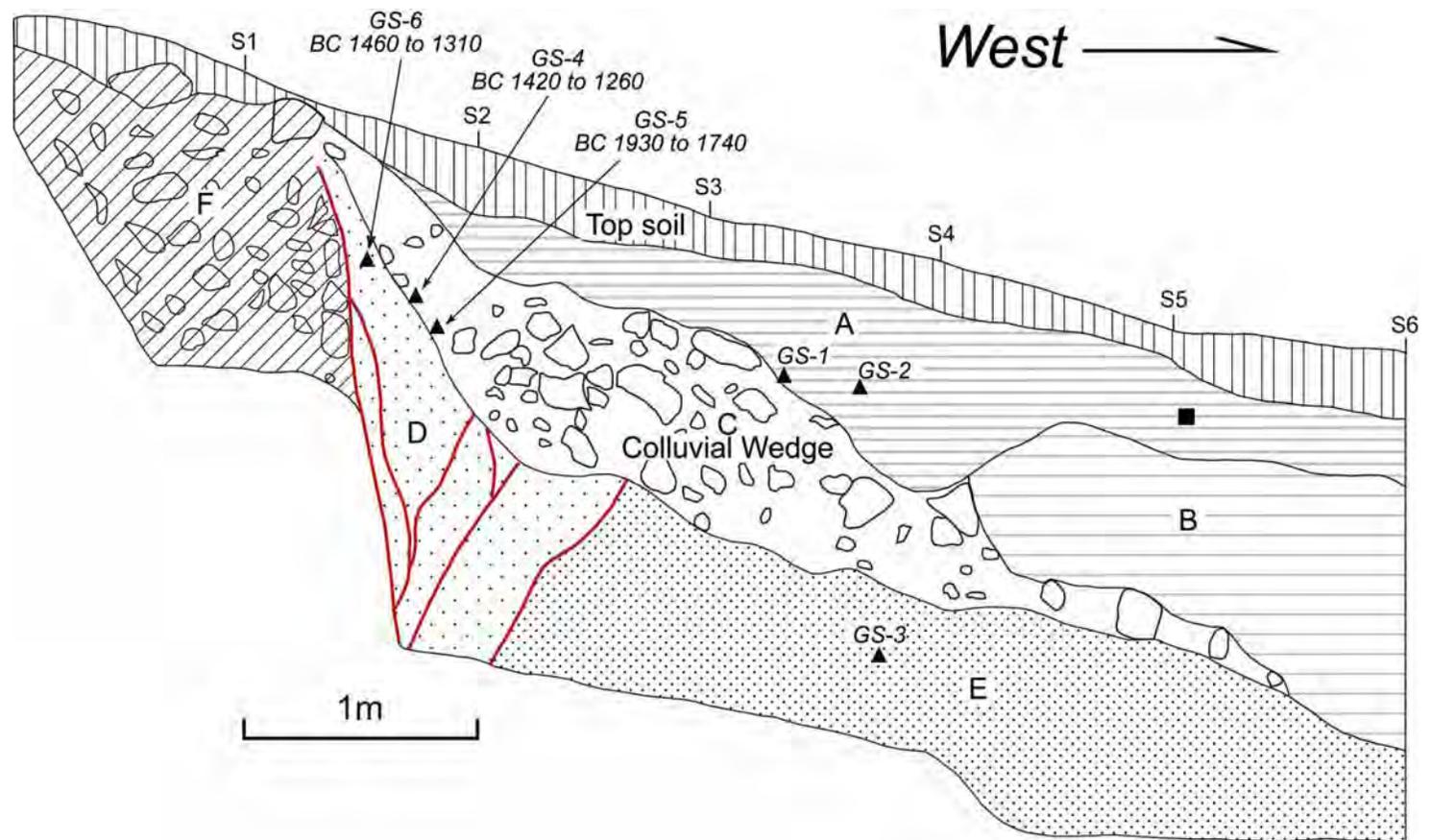


図 3.7-14 North Gamiトレンチ南側壁面のスケッチ 赤の実線が断層である。トレンチの地層はA層からF層に区分される。断層はD層、E層、およびF層を変位させ、C層に覆われている。C層はいわゆる“colluvial wedge”であり、地震直後に断層崖が崩落して堆積した。D層はV字状の落ち込み構造に堆積した地層である。E層はやや固結した砂礫層からなる。三角は<sup>14</sup>C年代測定の試料位置であり、数字は試料番号と暦年代を示す。四角は土器片の位置を示す。

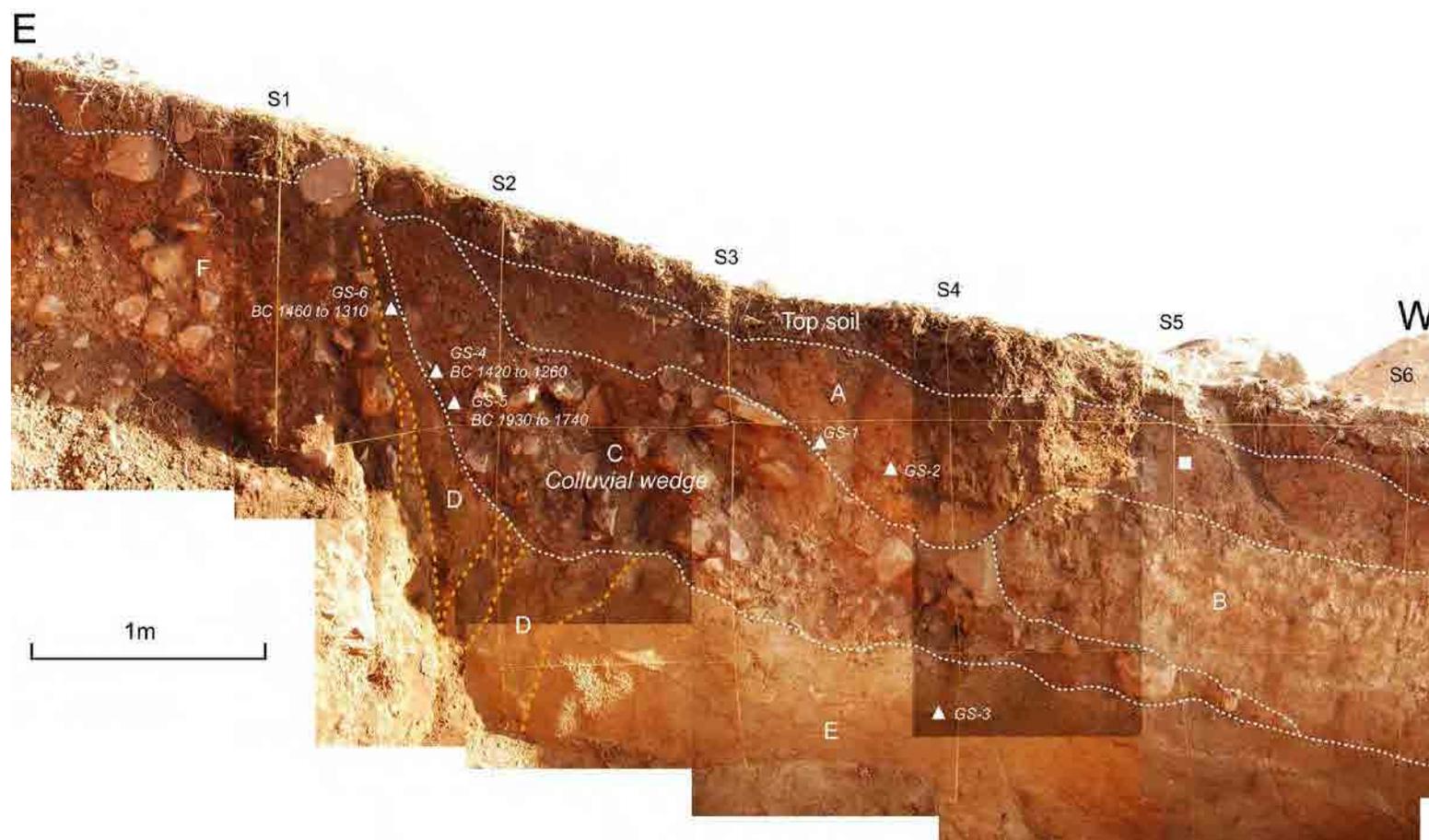


図 3.7-15 North Gami トレンチ南側壁面のモザイク写真

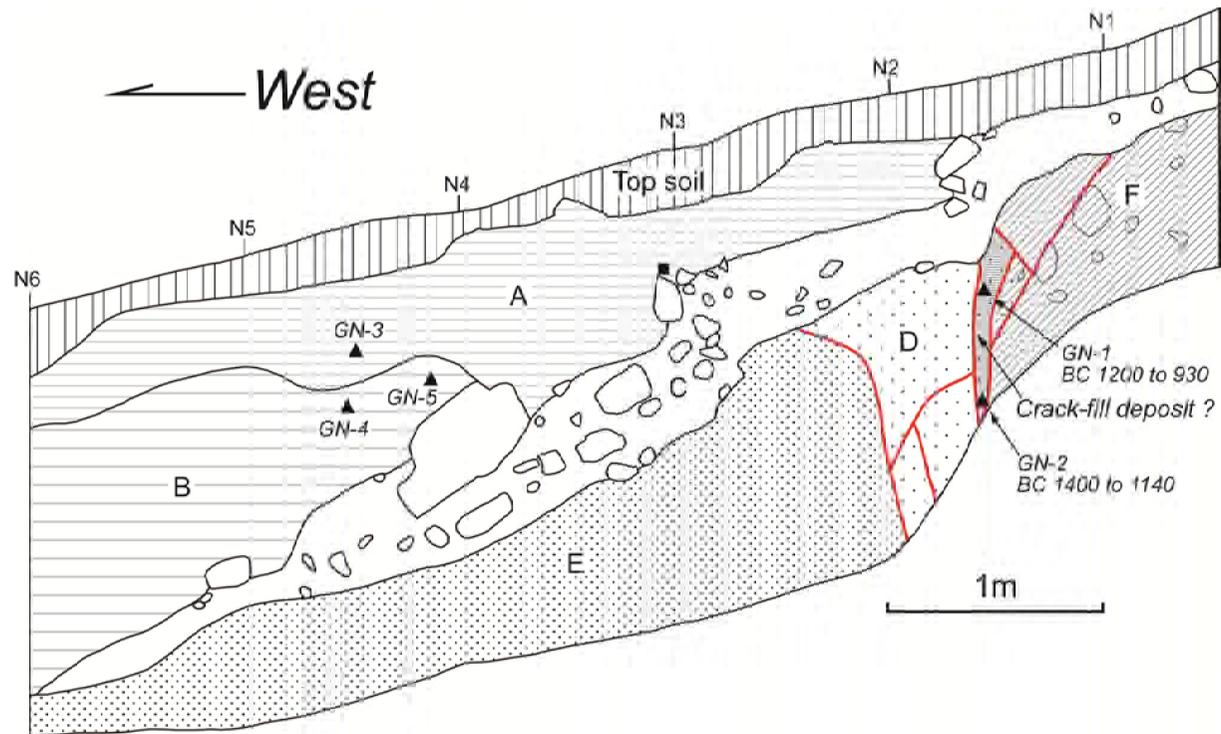


図 3.7-16 North Gami トレンチ北側壁面のスケッチ

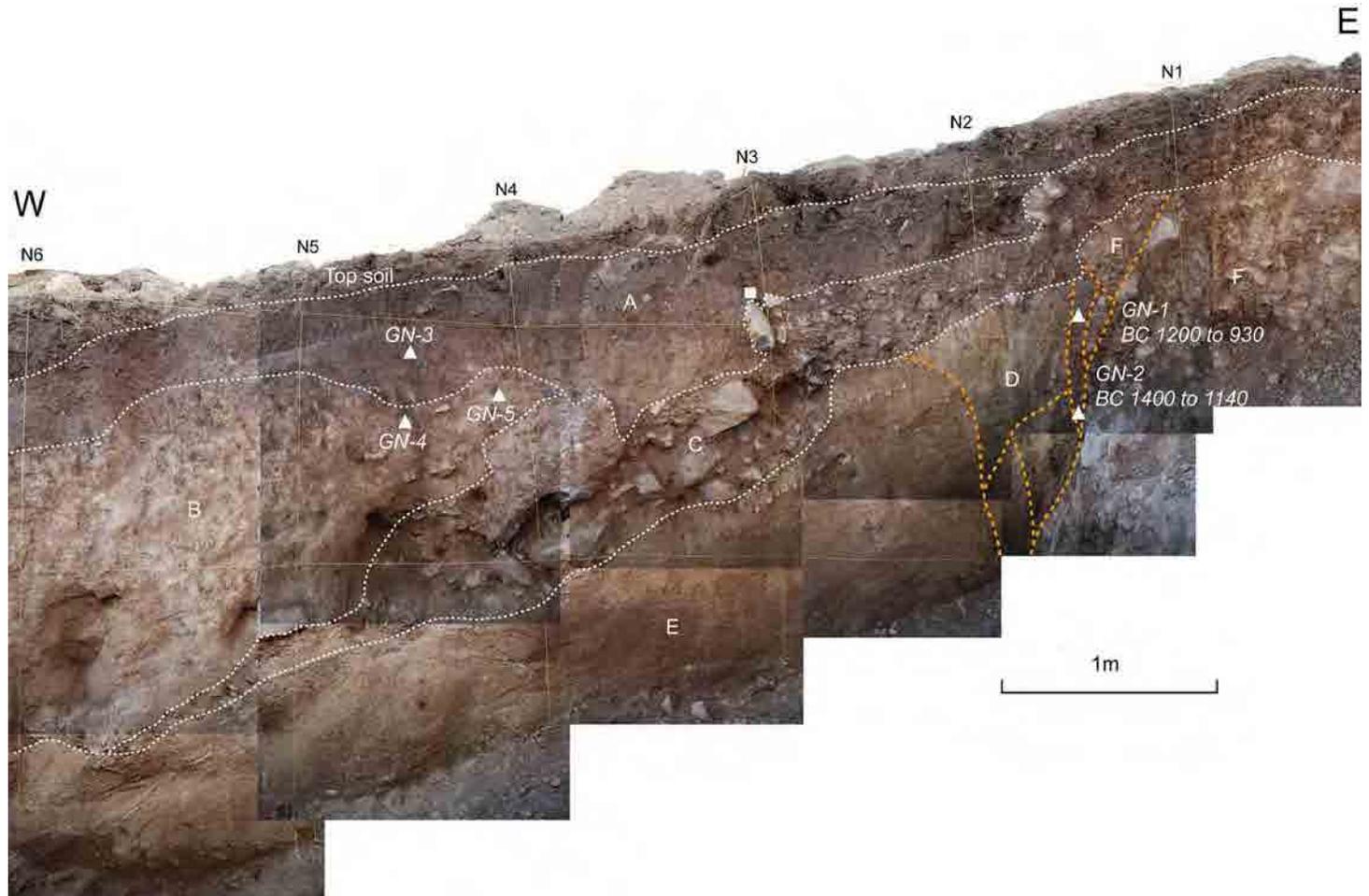


図 3.7-17 North Gami トレンチ北側壁面のモザイク写真

表 3.7-4 North Ganrni および Yelpin 地点におけるトレンチの  $^{14}\text{C}$  年代測定結果

Trench	Sample number	Laboratory number	Method	Sample	Measured radiocarbon age (yBP)	$\delta^{13}\text{C}$ (permil)	Conventional radiocarbon age (yBP)	Calender years (2 sigma)
North of Ganrni	GN-1	Beta-289724	AMS	organic sediment	2870 $\pm$ 40	-24.3	2880 $\pm$ 40	BC 1200 to 930
	GN-2	Beta-289725	AMS	organic sediment	2990 $\pm$ 40	-22.7	3030 $\pm$ 40	BC 1400 to 1140
	GN-3	Beta-289726	AMS	organic sediment	4100 $\pm$ 40	-24.6	4110 $\pm$ 40	BC 2870 to 2500
	GN-4	Beta-289727	AMS	organic sediment	3920 $\pm$ 40	-23.6	3940 $\pm$ 40	BC 2560 to 2300
	GN-5	Beta-289728	AMS	organic sediment	4390 $\pm$ 40	-23.6	4410 $\pm$ 40	BC 3320 to 2910
	GS-1	Beta-289729	AMS	organic sediment	4050 $\pm$ 40	-23.2	4080 $\pm$ 40	BC 2860 to 2490
	GS-2	Beta-289730	AMS	organic sediment	4210 $\pm$ 40	-23.0	3030 $\pm$ 40	BC 2910 to 2710
	GS-3	Beta-289731	AMS	organic sediment	6230 $\pm$ 40	-22.6	6270 $\pm$ 40	BC 5320 to 5210
	GS-4	Beta-289732	AMS	organic sediment	3050 $\pm$ 40	-23.8	3070 $\pm$ 40	BC 1420 to 1260
	GS-5	Beta-289733	AMS	organic sediment	3460 $\pm$ 40	-22.5	3500 $\pm$ 40	BC 1930 to 1740
	GS-6	Beta-289734	AMS	organic sediment	3090 $\pm$ 40	-23.4	3120 $\pm$ 40	BC 1460 to 1310
Yelpin	Ye-1	Beta-289735	AMS	organic sediment	2620 $\pm$ 40	-23.5	2640 $\pm$ 40	BC 840 to 780
	Ye-2	Bete-289736	AMS	organic sediment	1600 $\pm$ 40	-24.4	1610 $\pm$ 40	AD 380 to 550
	Ye-3	Beta-289737	AMS	organic sediment	2360 $\pm$ 40	-24.1	2370 $\pm$ 40	BC 530 to 390



図 3.7-18 North Garni トレンチ南側壁面の V 字状落ち込み構造(ねじり鎌の下) 地層は急傾斜で東側(写真左側)に傾斜している。

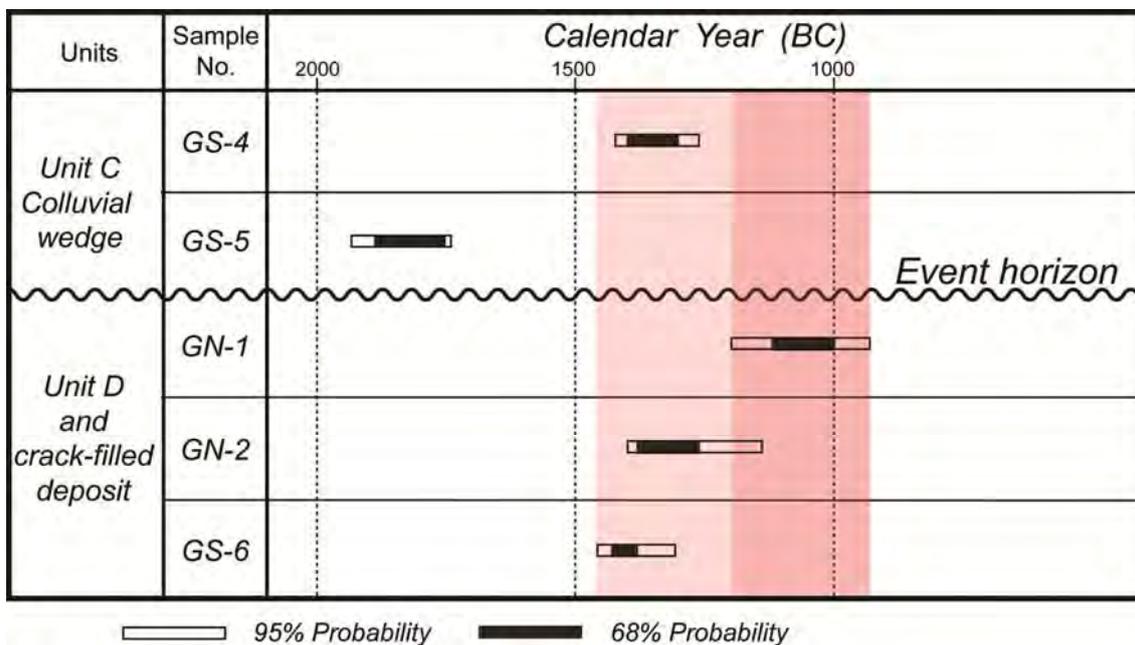


図 3.7-19 North Garni 地点における地震イベントの時期 イベントの時期は D 層および E 層堆積後、C 層堆積前である。北壁の断層崖基部の開口割れ目が地震直後に形成され、地震前に存在した表層堆積物が開口部に落ち込んだ。したがって、イベントの時期は V 字状落ち込み構造を埋めた堆積物が堆積した直後と推定される。

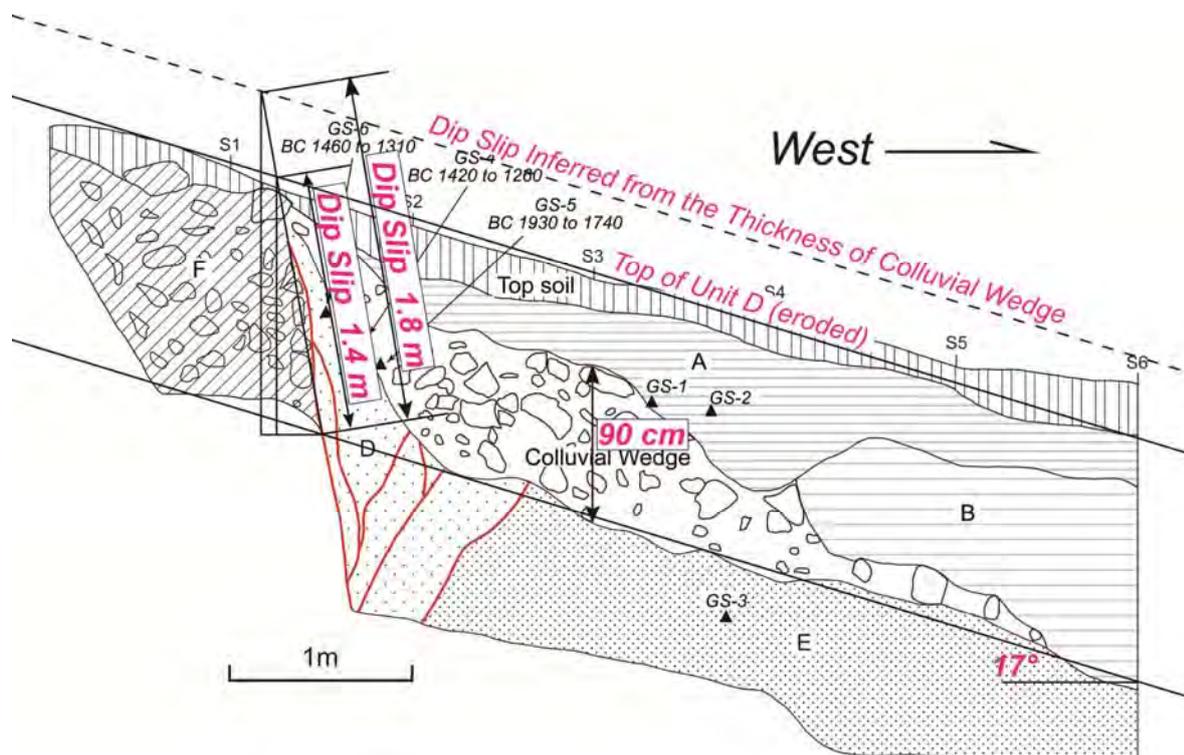


図 3.7-20 North Garmi トレンチ南側壁面で推定される 1 回の断層運動による変位量 断層下盤側の上部は浸食されているので、1 回の断層運動による変位量は 1.4m 以上である。“colluvial wedge”は断層崖の崩落により形成される。断層崖の高さは少なくとも“colluvial wedge”の厚さの約 2 倍と考えられている。“colluvial wedge”の厚さは 90cm であるので、変位量は約 1.8m 程度と推定される。

### 3) Yelpin 地点のトレンチ調査

#### ア. トレンチ地点周辺の地形

図 3.7-5 に Yelpin Y-3 地点のトレンチの位置を示す。図 3.7-21～図 3.7-23 にトレンチ地点周辺の地形を示す。写真のように植生が乏しい山体に北北西－南南東方向にのびる低断層崖が観察される。低断層崖は明瞭であり、Google Earth の画像でも容易に観察される。Yelpin Y-3 地点付近では、東側に面した高さ約 1m の直線的な低断層崖がみられる。現地を踏査したところ、天然ガスのパイプライン敷設のため作られた切り取り法面に断層露頭が見つかった。図 3.7-24 に示すように、断層の西側は古第三紀の石灰岩、東側は第四紀の堆積物からなる。第四紀の堆積物は乾燥とセメンテーションによりやや固結しているが、地表近くでは V 字状の落ち込み構造がみられ、未固結な砂礫層が落ち込んでいる(図 3.7-25)。石灰岩の断層面にはほぼ鉛直なスリッケンサイドがみられる(図 3.7-26)。

#### イ. トレンチで確認された層序とその $^{14}\text{C}$ 年代

断層露頭の近くで、長さ 10m、幅 2m、深さ 2～2.2m のトレンチを掘削した。図 3.7-27 に南側壁面のスケッチ、図 3.7-28 に南側壁面のモザイク写真を示す。

トレンチの地層は A 層から D 層に区分される。また、V1 と V2 の 2 つの V 字状落ち込み構造が観察される(図 3.7-29)。 $^{14}\text{C}$  年代測定の結果は表 3.7-4 に示されている。

**A層**:角礫～亜角礫、礫を含む土石流堆積物からなる。淘汰は進んでいない。Ye-2 は AD380-550 の年代を示す。

**B層およびC層**:赤褐色を呈する礫を含む砂質粘土からなる。ラミナが顕著である。ラミナの傾斜は地表とほぼ平行である。セメンテーションによりやや固結している。中部から下部は礫が少ないが、上部はやや礫を含んでいる。礫が多い部分をB層、その下位をC層とした。これらの層は土石流堆積物に挟まれた風成ローム層であろう。

**D層**:古第三紀の石灰岩である。幅約 40cm の断層ガウジを伴う。

**V1**:最大径 30～40cm の礫を含む砂礫層からなる。弱い堆積構造がみられ、40° から 50° の傾斜角度で西側・断層崖側に傾斜している。A層と層相が似ているが、礫径が大きく、断層崖から崩落・堆積した礫を含むものと考えられる。A層とV1の境界は断層であるか、単に折れ曲がっているかどうかはわからない。

**V2**:C層の砂質シルトのブロックや石灰岩礫を含む。C層のブロックは回転している。東側のB層およびC層との境界は開口割れ目であり、流入粘土がみられる。その東側にも S3(図 3.7-28 参照)に開口割れ目があり、A層に覆われている。

ウ. 地震イベントの時期

V1とV2のV字状の落ち込み構造から2回の地震イベントが推定される。最新イベントはV1を形成したイベントでA層堆積以降である。イベントの時期はAD380-550以降である。1つ前のイベントはV2を形成したイベントであり、B層堆積後、A層堆積前である。B層およびC層の年代値が得られていないので、イベントの時期は明らかでない。

エ. 変位量

図 3.7-27のスケッチの右上に示される、地表における崖の高さが1回の断層運動による変位量を表しているものと推定される。変位量は50cmから1m程度である。

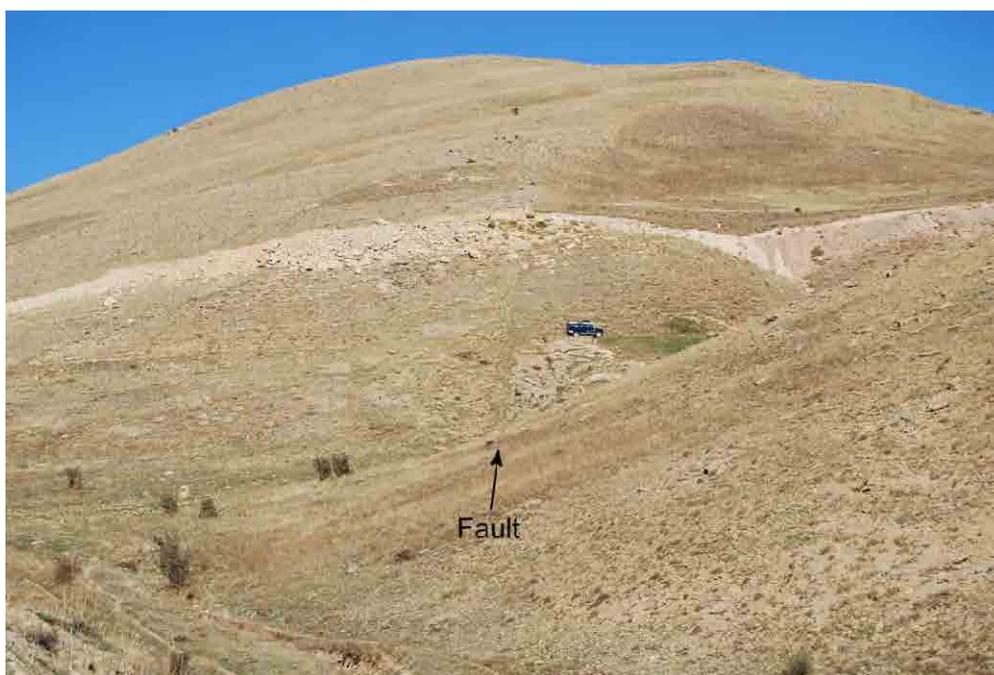


図 3.7-21 Yelpinにおける断層トレース 南から北を眺める。



図 3.7-22 低断層崖 東から西を眺める。写真中央の切り取り法面で断層露頭が見つかった。



図 3.7-23 低断層崖を掘削したトレンチ



図 3.7-24 断層露頭 左側は古第三紀の石灰岩。右側は第四紀の堆積物



図 3.7-25 断層上部の V 字状落ち込み構造 未固結の砂礫層からなる



図 3.7-26 断層面のスリッケンサイド ほぼ鉛直であり、断層は正断層である

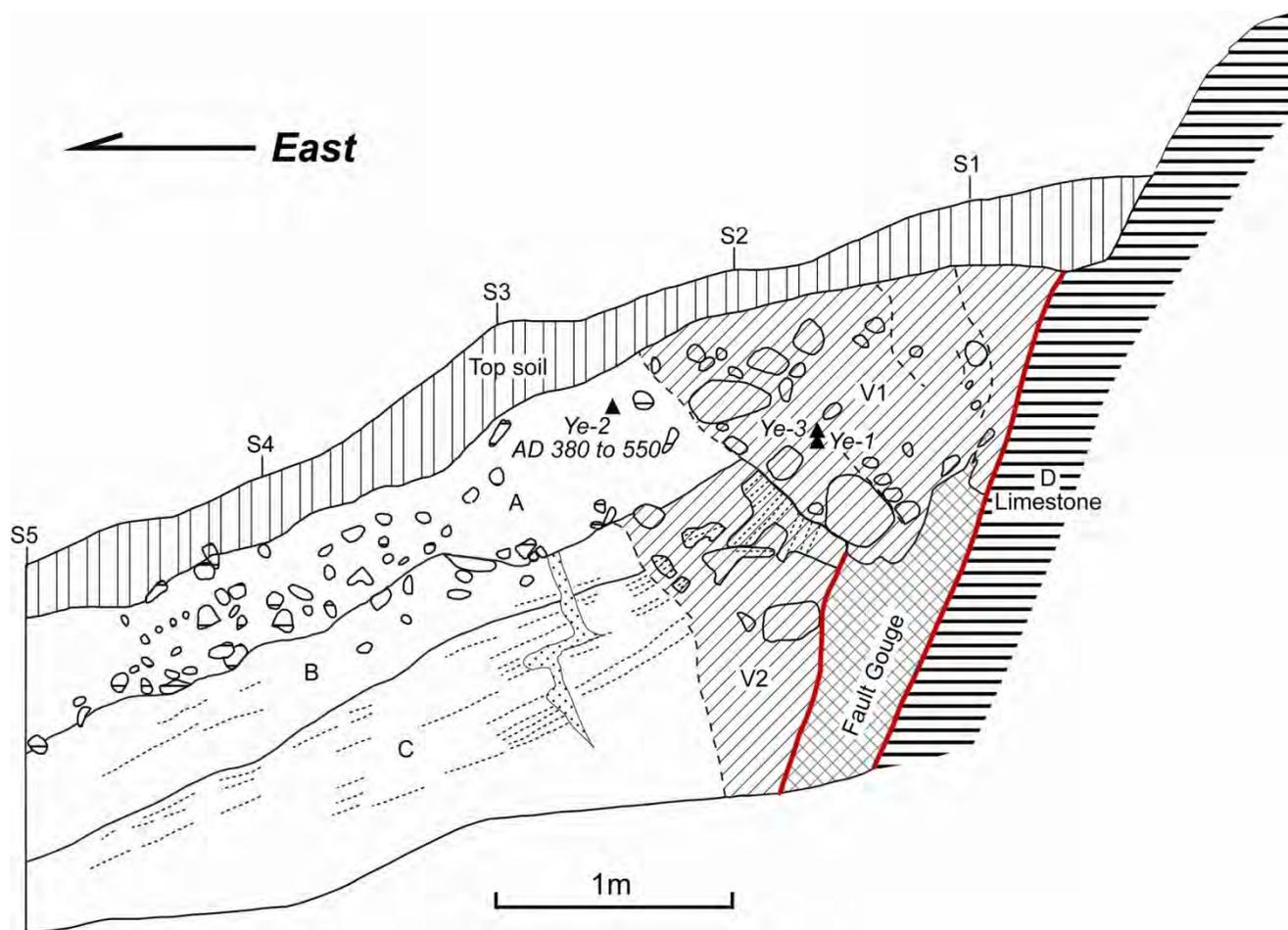


図 3.7-27 Yelzin Y-3 サイトにおけるトレンチ南側壁面のスケッチ 赤の実線が断層。2つのV字状落ち込み構造(V1とV2)がみられる、▲は<sup>14</sup>C年代測定サンプル採取位置

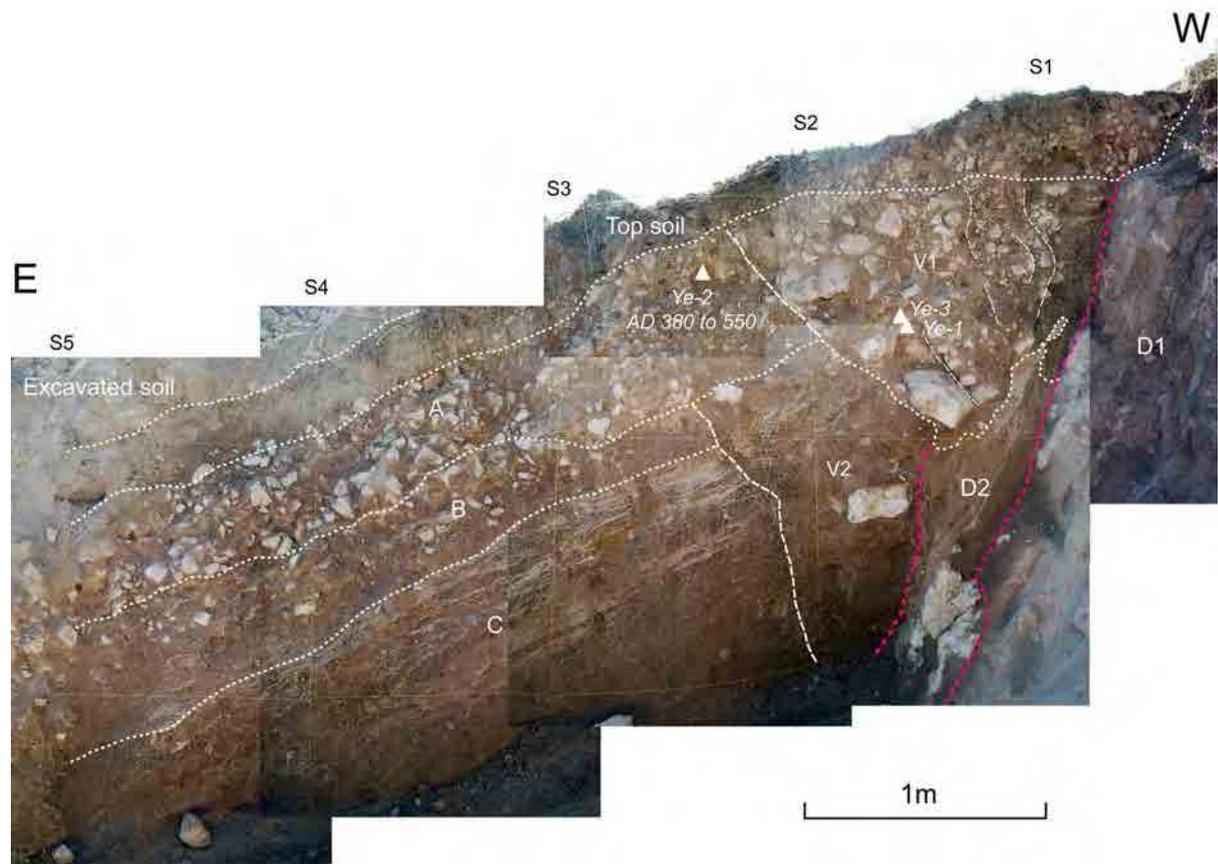


図 3.7-28 Yelgin Y-3 サイトにおけるトレンチ南側壁面のモザイク写真 D1:石灰岩、D2:石灰岩の断層粘土



図 3.7-29 Yelpin Y-3 サイトでの V 字状の落ち込み構造

### (3) Nor Ughi 地点でのパイロット・トレンチ調査

図 3.7-7 および図 3.7-8 にパイロット・トレンチ地点の位置を示す。パイロット・トレンチ調査を行った Nor Ughi 村はエレバン市の中心部から約 30km 南南東のアララト低地の北東縁に位置している。図 3.7-30 に Nor Ughi 村付近の Google Earth イメージを示す。Nor Ughi 村の北には西北西－東北東にのびる直線的な低崖がみられる。この地域は農業により地形が著しく改変されているものの、丘陵と段丘の地形境界をなす低崖は明瞭である。この低崖が低断層崖と推定され、現地調査を行ったところ、断層露頭が発見された(図 3.7-31 および図 3.7-32)。

断層の走向・傾斜は  $N62^{\circ}W, 17^{\circ}NE$  であり、低角度の逆断層である。断層面にはスリッケンサイドがみられ、その方向は  $N20^{\circ}E$  で、北側の岩盤が南側の未固結な砂礫層の上に乗上げる変位を示す(図 3.7-32)。断層露頭がみられる崖は断層と同じ方向にのびており、断層を詳しく観察できないので、断層露頭西側で断層に直交する方向でパイロット・トレンチを掘削した。

パイロット・トレンチのモザイク写真を図 3.7-33 に示す。トレンチの地層は砂礫層1および2、砂層、および白亜紀の堆積岩類からなる。

**砂礫層1および2:** 未固結な砂礫層からなる。亜角礫からなる細礫を多く含む。小さい河川の堆積物と考えられる。断層露頭では東から西への水流を示すラミナがみられる。

**砂層:** 灰白色を呈するやや固結した中粒～粗粒な砂からなる。

**白亜紀の堆積岩:** 灰緑色を呈する砂岩からなる。断層近傍では幅約 50cm の断層ガウジがみられる。温泉沈殿物であるカルサイト脈が多くみられるが、断層ガウジではカルサイト脈は破碎されている。

トレンチでは F1 および F2 の 2 条の断層がみられる。F1 断層の傾斜角度は約  $26^{\circ}$  であり、白亜紀の堆積岩が未固結な砂礫層の上に乗上げている。断層と地層の切断・被覆関係から 2 回の地震イベント

トが推定される。F2 断層は砂層を変位させ、砂礫層2に覆われている。砂層堆積後、砂礫層2堆積前にイベントが推定される。F1 断層はすべての地層を変位させている。砂礫層1堆積後にイベントが推定される。なお、 $^{14}\text{C}$ 年代測定の試料が採取されなかったので、イベントの時期は明らかでない。

(IGS の Dr. A. S. Karakhanian は砂礫層 1 および 2 中に第四紀前期～中期の古いテフラ(火山灰層)が認められるのでトレンチで確認された断層は古くて活断層ではないと主張している。しかし、トレンチでは、砂礫層 1 および 2 中にテフラは認められなかった。もし、砂礫層 1 および 2 中にテフラがあったとしても、砂礫層 1 および 2 は小河川の河成堆積物なので、オリジナルな堆積ではなく、2 次的な堆積によるものである。つまり、砂礫層 1 および 2 はテフラそのものの地質年代より新しいということである。砂礫層 1 および 2 が未固結であることから、これらの層は新しく、おそらく後期更新世～完新世のものと思われる。)

1 回の断層運動による変位量は、断層上盤が浸食されているので明らかでないが、少なくとも 2.7m 以上である(図 3.7-34)。

Nor Ughi 地点で確認された断層は Vedi 断層の西延長上で見つかった。Vedi 断層は地質断層であり、活断層ではない。Vedi 断層の西延長部分は、沖積平野と段丘平坦面の地形境界にそってさらに南へ伸びていると推定されるエレバン断層の活動に伴って動いた可能性がある。トレンチで確認された断層は、2 次的な断層と推定されるが、これを確認するためにはエレバン断層の活動の証拠を見つけることが不可欠である。

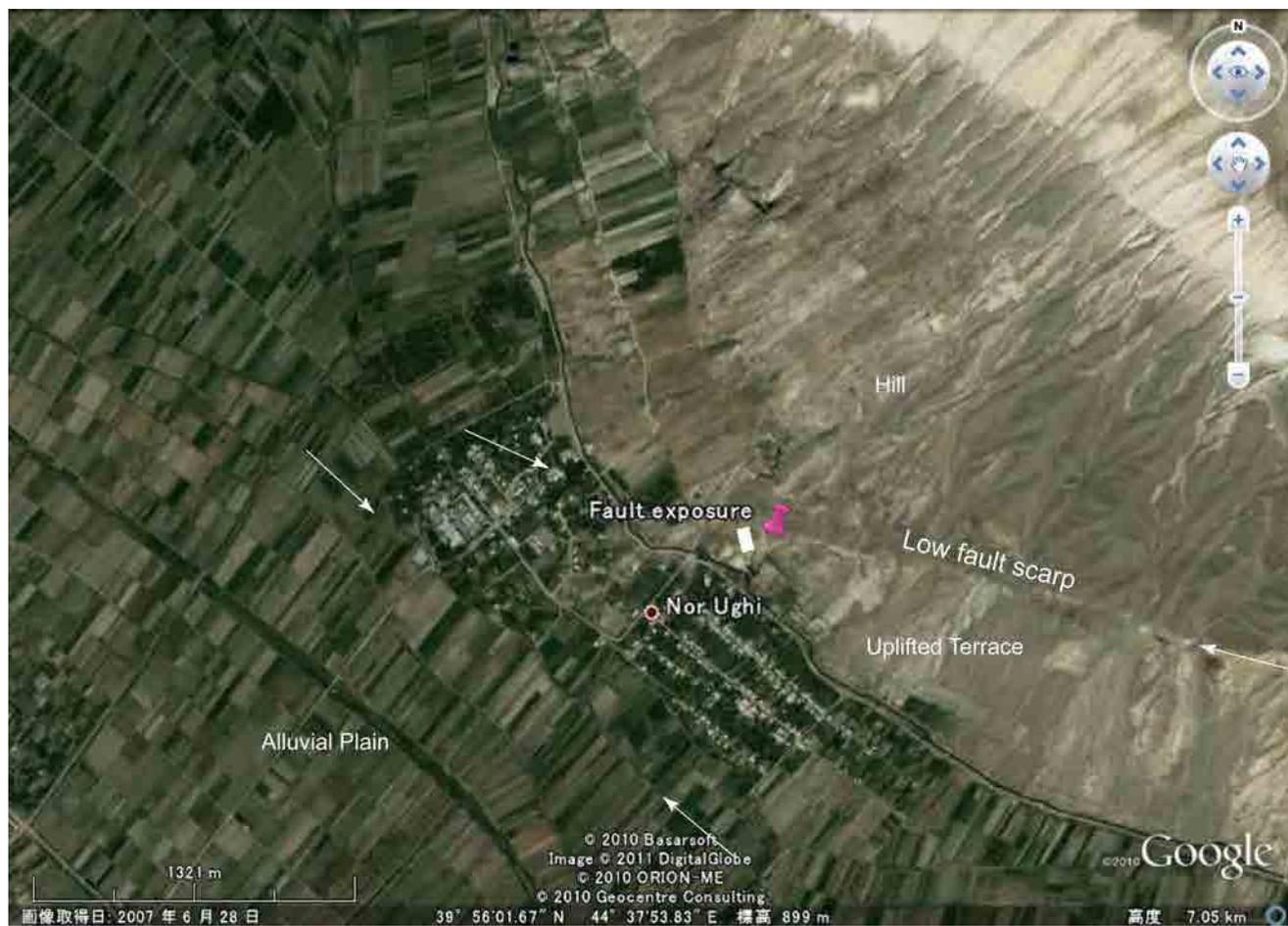


図 3.7-30 Nor Ughi 村北における断層露頭(ピンクのピン)とパイロット・トレンチの位置(白の長方形) 丘と隆起段丘の地形境界に直線的な低断層崖が明瞭である。しかし、Nor Ughi 村周辺の段丘が隆起しているため、主たる断層は隆起した段丘と沖積平野の地形境界に推定される



図 3.7-31 Nor Ughi 村北の断層露頭 写真中央の人がいるところが低角度の逆断層。断層から上が白亜紀の岩盤(縞模様が見えるところ)であり、下に未固結の砂礫層が分布している。パイロット・トレンチは写真左端で掘削された。



図 3.7-32 断層部の写真 ねじり鎌の部分が未固結の砂礫層。その上部が白亜紀の砂岩であり、断層面にスリッケンサイドがみられる。断層の走向・傾斜は  $N62^{\circ}W, 17^{\circ}NE$  であり、スリッケンサイドの方向は  $N20^{\circ}E$  である

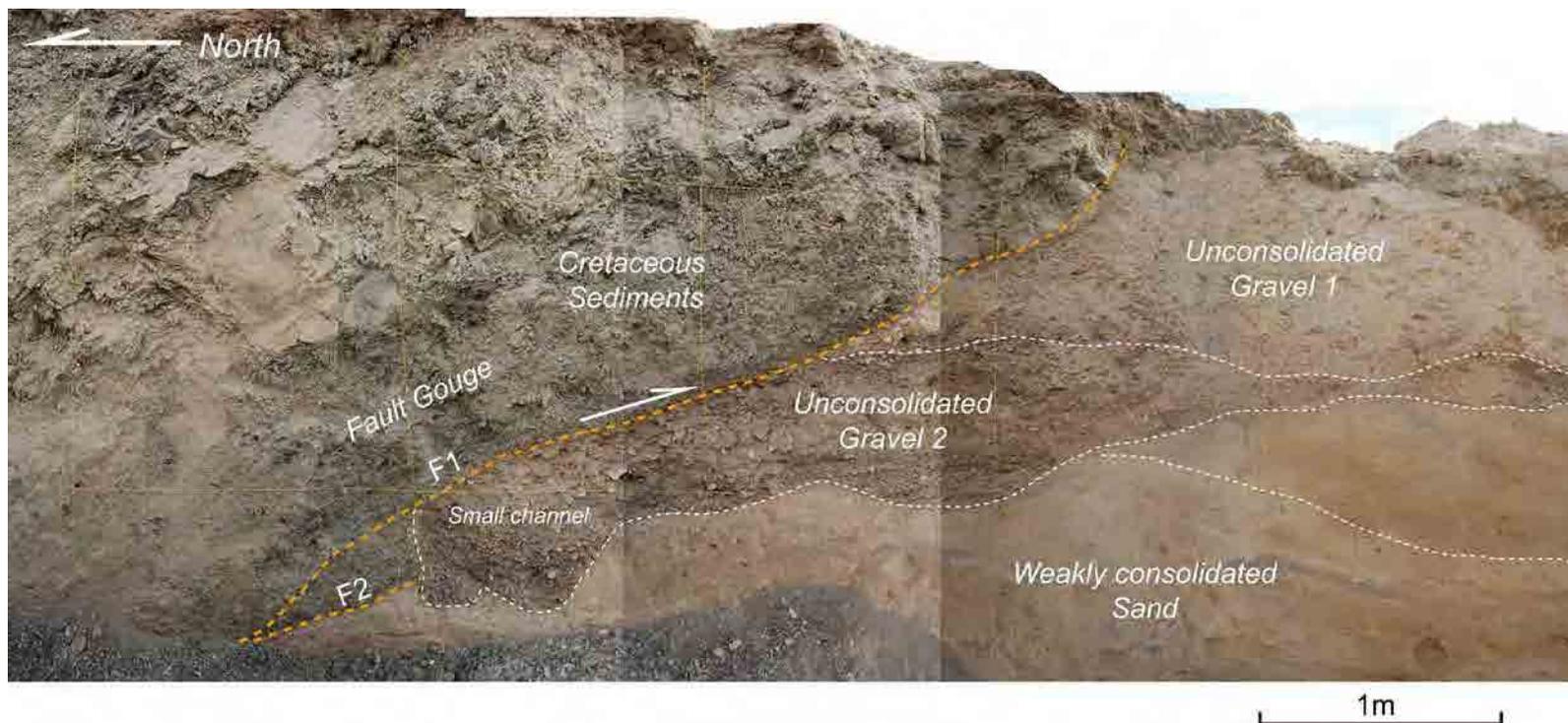


図 3.7-33 トレンチ東側壁面のモザイク写真 白亜紀の堆積岩が第四紀の砂礫層および砂層の上に低角逆断層で乗り上げている。第四紀層はやや固結砂、未固結の砂礫層 2、砂礫層 1 からなる。F1 と F2 の 2 つの断層がみられ(赤の破線)、2 回の地震イベントが推定される。F2 断層は砂層を変位させ、砂礫層 2 に覆われている。F1 断層はすべての地層を変位させている。

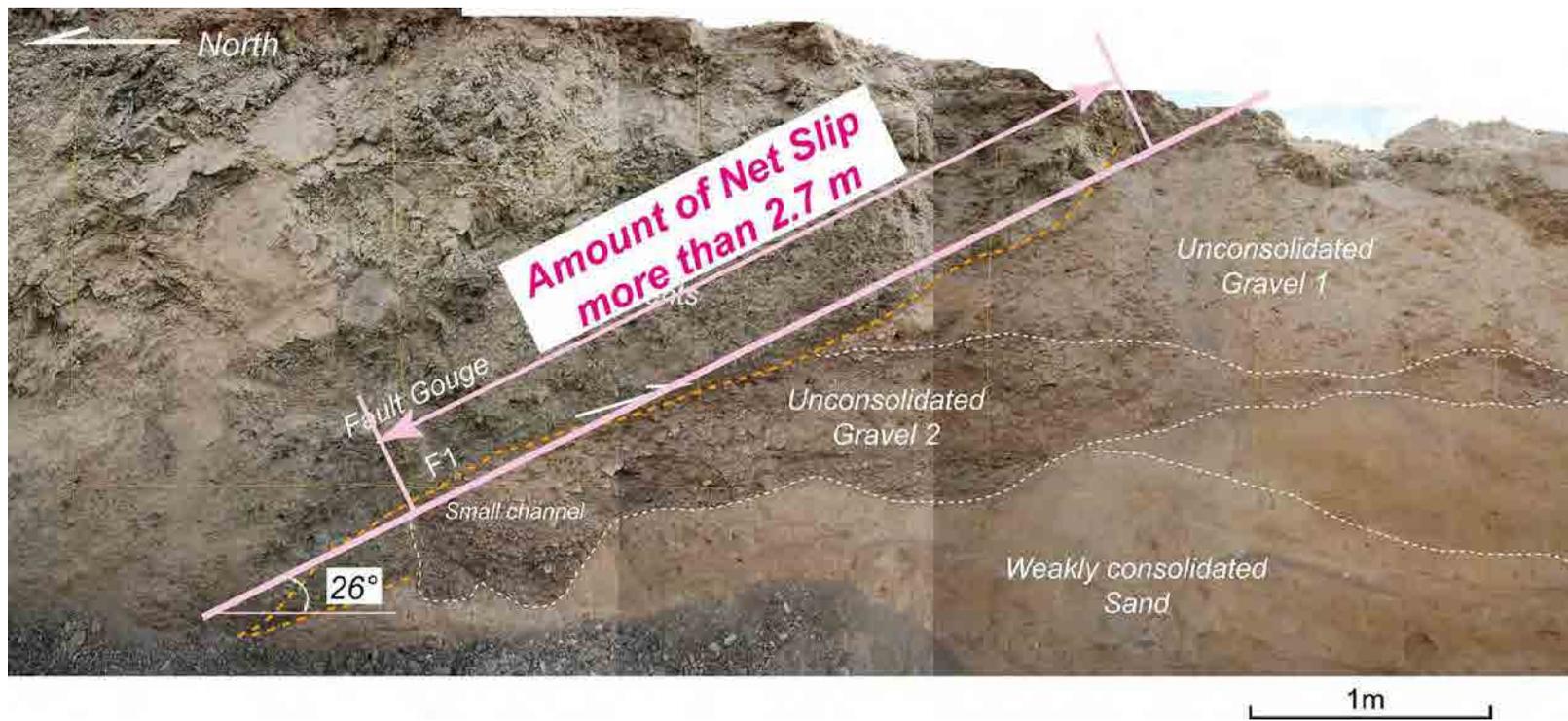


図 3.7-34 F1 断層のネット・スリップ 上盤側が浸食されているので、ネット・スリップは 2.7m 以上である

### 3.7.4 将来の地震の発生確率

表 3.7-5 に BPT モデル (Brownian Passage Time Model) による地震発生の 50 年確率を示す。ガルニ断層の GF1 セグメントでは 1988 年に Ms 6.9 のスピタク地震が発生している。地震後に行われたトレンチ調査によると、GF1 セグメントでの地震の再来周期は 4000~5000 年である (Philip et al. 1992)。GF2 セグメントでは 1679 年に M7.0 のガルニ地震が発生している。また、North Garni 地点のトレンチ調査によると、BC1000 年頃にも地震が発生しており、GF2 セグメントの地震の再来周期は 2700 年程度と推定される。GF3 セグメントでは、再来周期はわからないが、AD380~550 年以降に地震が発生している。このように、ガルニ断層の GF1、GF2、および GF3 セグメントでは歴史時代に地震が発生しており、地震の再来周期も 2700 年以上と長いので、今後 50 年間に発生する地震の確率はきわめて小さい。

エレバン断層に関しては歴史地震の有無およびその再来周期などはまったく解明されていない。古代アルメニアの都であった Dvin が AD893 年に大きな地震被害を受けたという歴史記録がある (Georisk のアルメニア原子力発電所近くの歴史地震に関する報告書)。Dvin はエレバン断層の近くにあるため、この地震はエレバン断層で発生したものではないかと言われているが、エレバン断層が AD 893 年に発生したことを示す証拠は見つかっていない。エレバン断層でのトレンチ調査が望まれる。次の 3.7.5 では、2011 年に実施したエレバン断層の追加トレンチ調査結果を述べる。

表 3.7-5 エレバン市周辺に分布する活断層の 50 年地震発生確率

Segment	Events	Reccurrence Period (year)	Elapsed Time since Latest Event (year)	50 Years Prob. (%)	Estimated Magnitude (Mw)
Garni Fault					
GF1	1988 Spitak earthquake (Ms 6.9)	4000-5000 <sup>3)</sup> ?	23	0.0	6.9
GF2	1679 Garni earthquake (M 7.0) <sup>1)</sup> BC 1000 <sup>2)</sup>	2700 <sup>2)</sup>	332	0.0	6.8-7.0 <sup>2)</sup>
GF3	after AD 380 to 550 <sup>2)</sup> (AD 893 ?)	2700 <sup>2)</sup> ?	1118	1.2	6.8-7.0 <sup>2)</sup>
GF4	?	?	?	?	?
GF5	AD 910 ?	?	?	?	?
Yerevan Fault					
Central Segment	AD 893 ?	?	?	?	6.7-6.9 <sup>2)</sup>

1) Georisk report, 2) This study, 3) Philip et al. (1992)

### 3.7.5 エレバン断層での追加トレンチ調査

最初の計画では、エレバン断層 (図 3.7-35 参照) は伏在断層であるため、のトレンチ調査は困難と思われた。このためガルニ断層を対象として 2 ヶ所でトレンチ調査を行い、断層の証拠を見つけることができた。しかし、2010 年末にエレバン断層の現地補足調査で、Nor Ughi 地点 (図 3.7-30) で断層露頭が見つかった。また、断層露頭の西の Nor Ughi 1-1 地点で明瞭な逆断層が確認された (図 3.7-33、図 3.7-34)。

Nor Ughi 1-1 地点で確認された断層は Vedi 断層のトレース上に位置している。しかし、既存調査によれば Vedi 断層は地質断層で活断層ではない。したがって、Vedi 断層の Nor Ughi 地点で確認された断層はエレバン断層の活動によって励起された2次的な活動である可能性がある。2次的な活動とは言え、エレバン断層のすぐそばで発見されたのであるから、エレバン断層でもトレンチ調査が可能であると判断され、2011年の調査として実施された。

#### (1) エレバン断層でのトレンチ調査

上記のように、最初エレバン断層でのトレンチ調査は困難であると思われたが、下記の湯女可能性が考えられた。

- 1) 断層が部分的に地表に現れているかもしれない
- 2) 断層は確認できないかもしれないが、変位や液状化の痕跡が見つかるかもしれない
- 3) Nor Ughi 1-2 地点と同様、2次的断層の調査から再来周期が推定できるかもしれない

図 3.7-35 に示したように、低崖がアララト平野の北～北東縁に確認できる。そこで、エレバン断層上でのトレンチ地点に適した地点を、低崖の近くで現地調査によって探した。その結果、メツァモールで2箇所、Nor Ughi で1箇所が選定され、トレンチ調査が実施された(図 3.7-35、図 3.7-36、図 3.7-37)。しかし、エレバン断層そのものや、断層運動による変位、液状化の痕跡は見つからなかった。低崖は衛星写真では明瞭に確認できるが、実際にはなだらかな斜面であり、トレンチ調査は困難だった。また、耕作によって地表面は変形しており、推定した低崖の位置を現地で見つけることは困難だった。エレバン断層をトレンチ調査で見つけることはできなかったが、マグニチュード7未満の地震は地表に痕跡を残さない場合があるので、エレバン断層がマグニチュード7未満の地震を発生させることは大いにありうることである。

#### (2) Nor Ughi 1-2 地点でのトレンチ調査

Nor Ughi 地点で確認された断層は未固結層を変形させているため、明瞭な活断層であるといえる。しかし、2010年の調査では年代測定が行われていないため、Vedi 断層は古い断層で活断層ではないという可能性も残った。このため、Vedi 断層を横切る Nor Ughi 1-2 地点で、年代測定を目的としたトレンチ調査を行った(図 3.7-38)。採取した7資料を使って年代測定を行った。結果を図 3.7-39 および図 3.7-40 中に示す。砂層と砂礫層は AD70～1450 年を示す。したがって、Vedi 断層は活断層であることが確認され、おそらく893年の Dvin 地震の際に活動していることが分かった。残念ながらこの地域は乾燥した気候であるため、炭化物や有機物の資料が得られず、精度のよい年代測定はできなかった。今回は、砂礫層中の有機土を資料としたが、さらなるトレンチ調査を行って<sup>14</sup>C法、あるいはOSL法(光ルミネッセンス法)によって調査することが望まれる。OSL法はアルメニア国内でも実施可能なので、より望ましい。

#### (3) Nor Ughi 地点での調査結果の解釈

Nor Ughi 1-2 地点で確認された断層は Nor Ughi 1-1 地点で確認された断層と同じものである。しかし、既存文献では Vedi 断層は活断層ではないとされている。また、Vedi 断層は Vedi 谷沿いに東の山中へ

と続いており、エレバン断層と一致しない。Vedi 断層の少なくとも一部がアクティブであることから以下の2つの仮説が考えられる。

- 1) Vedi 断層は地質断層ではなく、活断層である。
- 2) Vedi 断層は地質断層であるが、2次的に動いた。

2)の仮説を証明するためには、主たる断層の存在を示す必要がある。現状では今だ不明確な点が多いが、Vedi 断層の Nor Ughi 地点で、トレンチ調査によって活断層が確認されたことは顕著な成果である。

このプロジェクトの調査ではエレバン断層が伏在断層であり、トレンチ調査では確認できないことが示された。エレバン断層を確認するためには反射法探査のような物理探査手法を用いることを勧める。

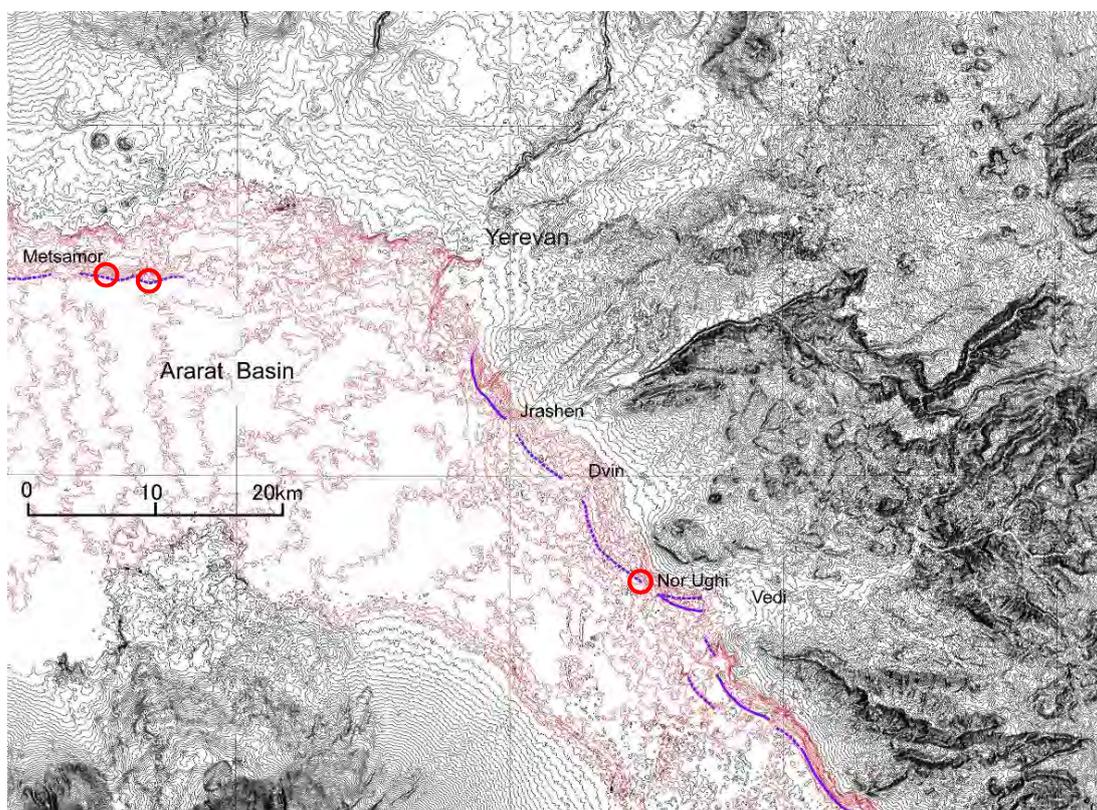


図 3.7-35 衛星写真から推定したアララト平野北～南東縁に沿った低断層崖(紫色の線) エレバン断層沿いに、メツァモールで2箇所、Nor Ughi で1箇所トレンチ調査を実施

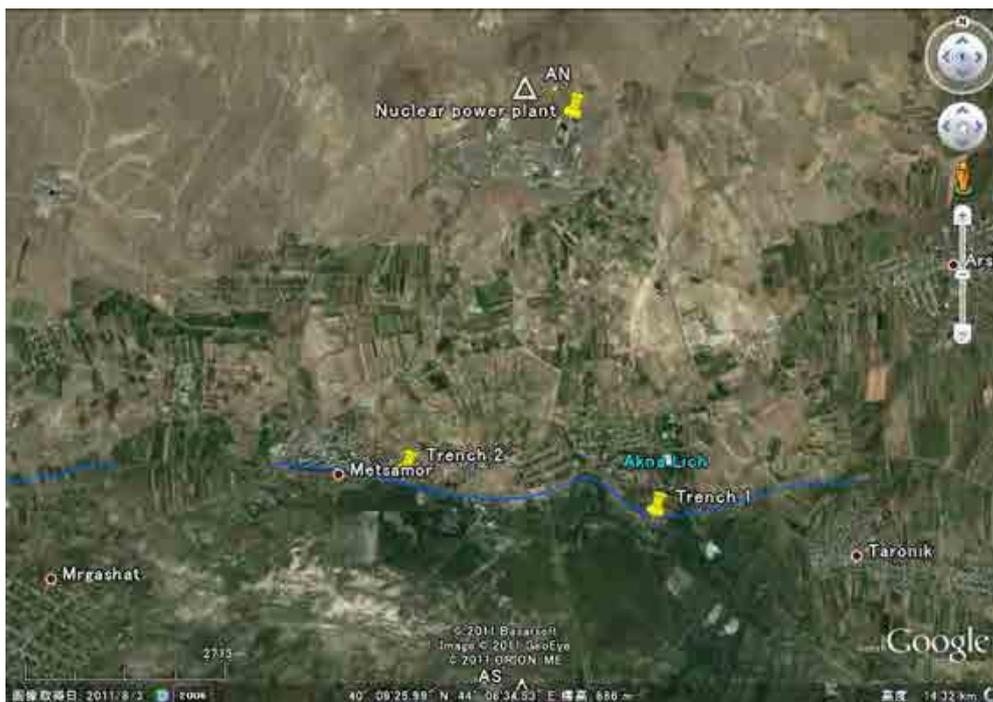


図 3.7-36 メツアモールサイトでのトレンチ調査地点 青線が推定されたエレバン断層、2ヶ所でトレンチ調査を行ったがエレバン断層は確認できなかった

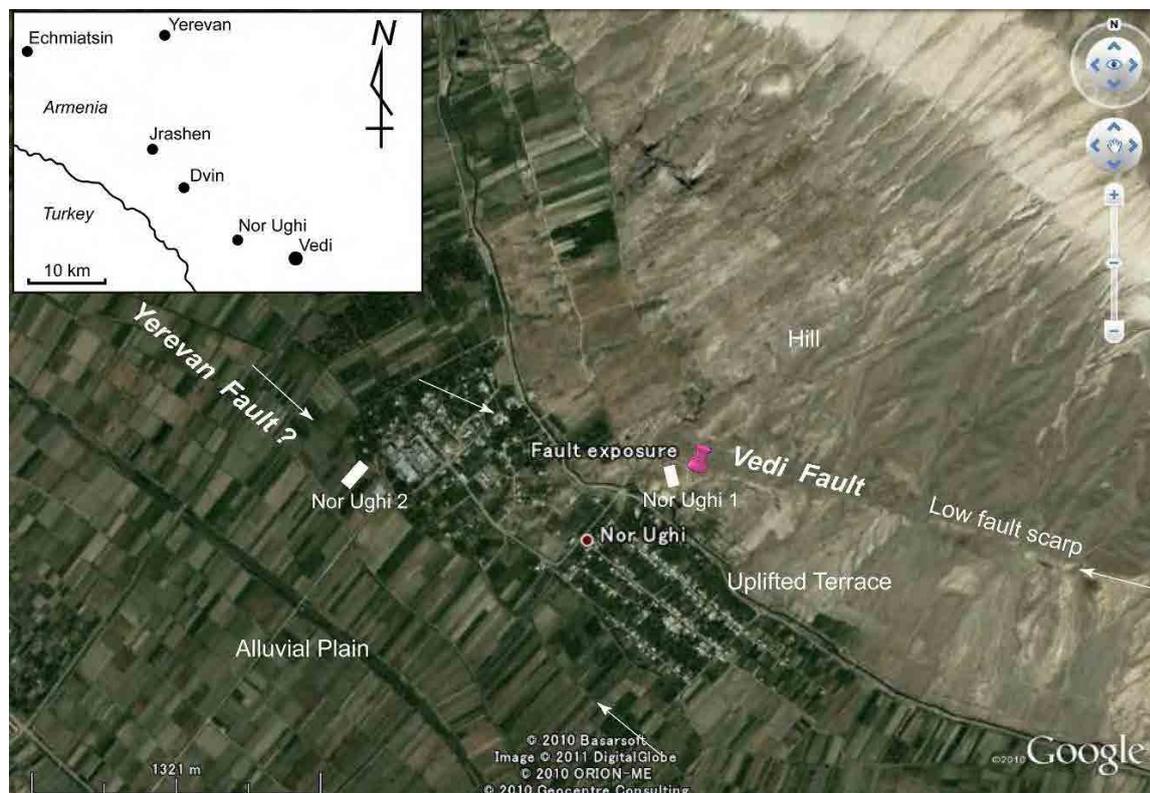


図 3.7-37 Nor Ughi サイトでのトレンチ地点 Nor Ughi 1 で2ヶ所(Vedi 断層)、Nor Ughi 2 で1ヶ所調査したがエレバン断層は確認されなかった

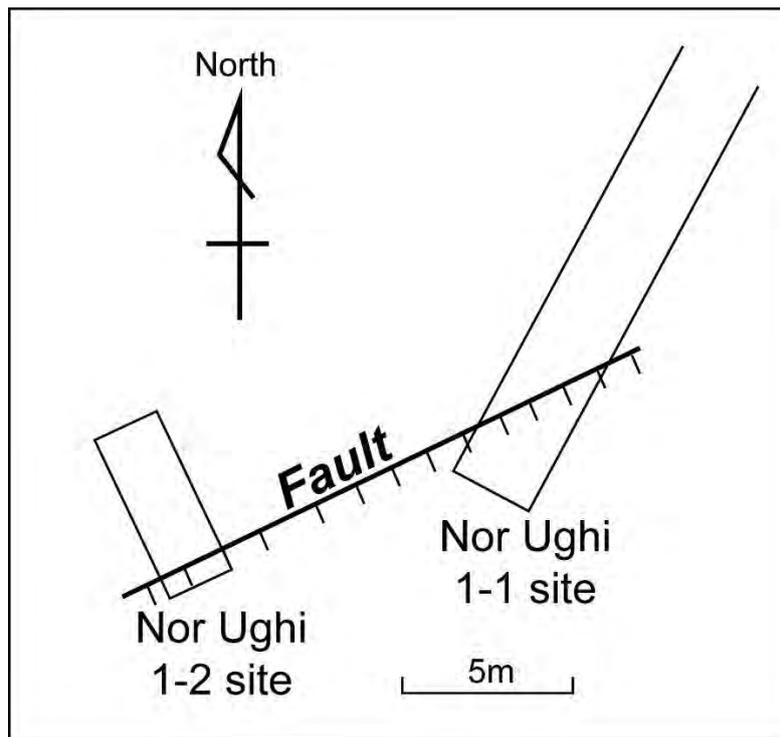


図 3.7-38 Nor Ughi サイトでのトレンチの位置

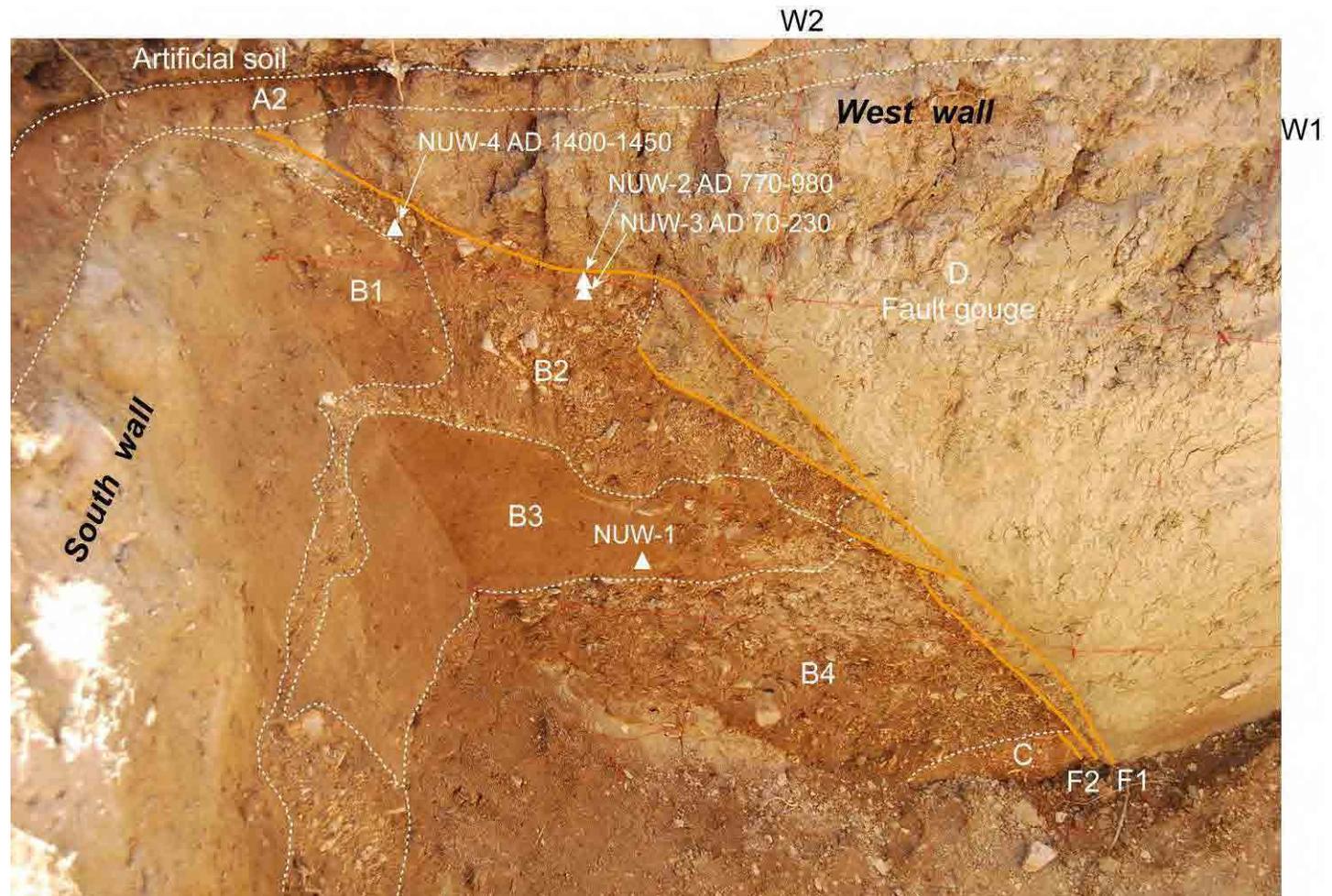


図 3.7-39 Nor Ughi 1-2 地点西側壁面の写真 第三紀層が未固結の礫層である B1, B4, C1 を覆っている、F1 断層は AD70~980 年(NUW-2)または AD1400~1450 年(NUW-4)以降に活動した

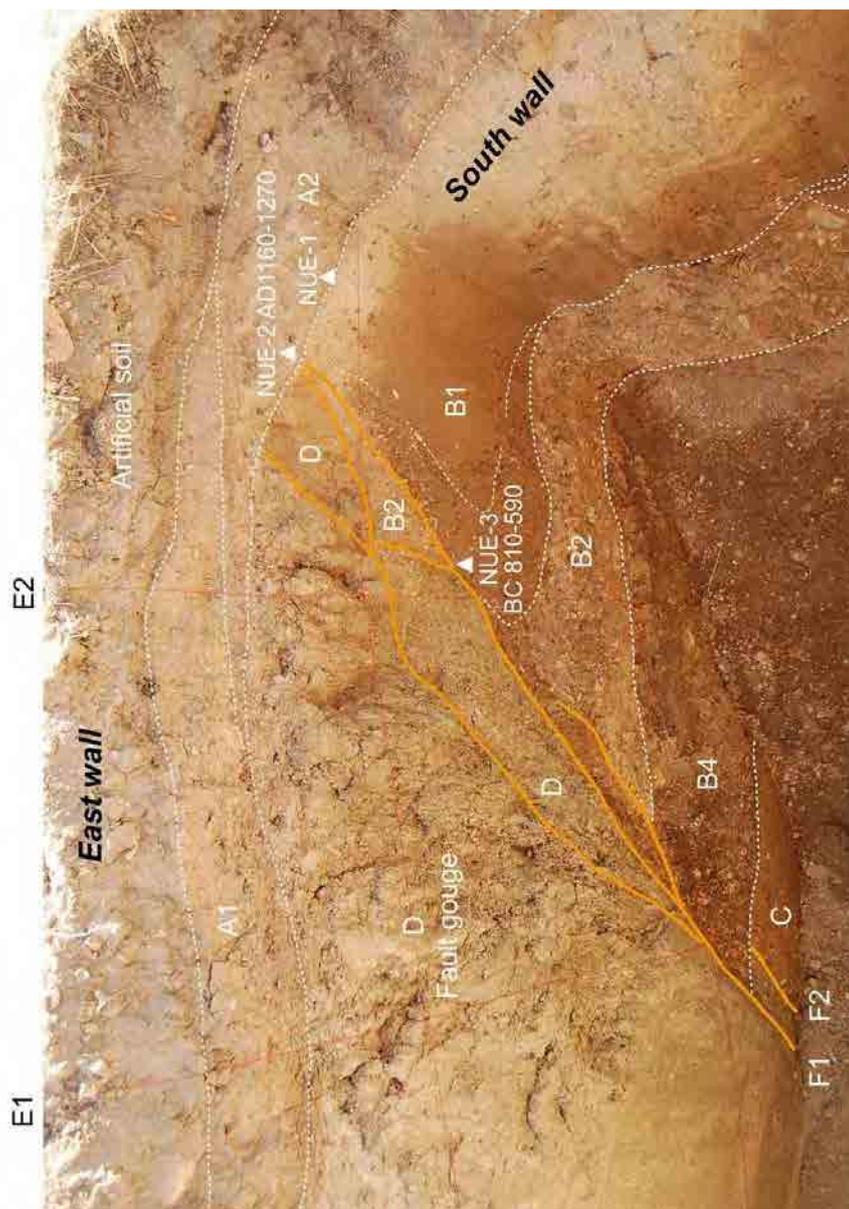


図 3.7-40 Nor Ughi 1-2 地点東側壁面の写真 F1 断層が A1、A2 層に覆われているので BC810～590 年と AD1160～1270 年の間に活動したと推定される

**参考文献:**

- Aslanyan, A. T., 1954, Deep fault near Yerevan City. Volume of contribution summaries of the 6th Science and Technology Conference of the Transcaucasian High Technological University Professors and Lecturers (in Russian)
- Aslanyan, A. T., 1958. Regional geology of Armenia, HaiPetHrat, Yerevan (in Russian)
- Gabrielyan, A. A., 1959, Main issues of the geotectonics in Armenia. Publishing House of the AS of the Armenian SSR, Yerevan (in Russian)
- Gabrielyan, A. A., O. A. Sargsyan, and G. P. Simonyan, 1981, Seismotectonics of the Armenian SSR. Publishing House of the Yerevan State University, Yerevan (in Russian)
- Gilbert, G. K., 1890, Lake Bonneville. U.S. Geol. Survey Monograph 1.

- Karakhanian, A.S., V.G. Trifonov, H. Philip, A. Avagyan, K. Hessami, F. Jamali, M.S. Bayraktutan, H. Bagdassarian, S. Arakelian, V. Davtian, and A. Adilkhanyan, 2004, Active faulting and natural hazards in Armenia, eastern Turkey and northwestern Iran. *Tectonophysics*, 380, 189-219.
- McCalpin J. P., edited, 1996, *Paleoseismology*; Academic Press New York p.588.
- Nelson, A. R., 1992, Lithofacies analysis of colluvial sediments- an aid in interpreting the recent history of Quaternary normal faults in the Basin and Range province, western United States. *J. Sediment, Pet.*, 62, 607-621.
- Philip, H., E. Rogozhin, A. Cisternas, J.C. Bousquet, A. Borisov, A.S. Karakhanian, 1992, The Armenian earthquake of 1988 December 7: faulting and folding, neotectonics and paleo –seismicity. *Geophys. Int. J.*, 110, 141-158.
- Philip, H., A. Avagyan, A. Karakhanian, J.-F. Ritz, and S. Rebai, 2001, Slip rates and recurrence intervals of strong earthquakes along the Pambak-Sevan-Sunik fault (Armenia). *Tectonophysics*, 343 (3-4), 205-232.
- Reimer, P.J., Baillie, M.G.L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Bertrand, C.J.H., Blackwell, P.G., Buck, C.E., Burr, G.S., Cutler, K.B., Damon, P.E., Edwards, R.L., Fairbanks, R.G., Friedrich, M., Guilderson, T.P., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kromer, B., McCormac, G., Manning, S., Bronk Ramsey, C., Reimer, R.W., Remmele, S., Southon, J.R., Stuiver, M., Talamo, S., Taylor, F.W., van der Plicht, J., Weyhenmeyer, C.E., 2004. IntCal04 terrestrial radiocarbon age calibration, 0-26 cal kyr BP. *Radiocarbon* 46, 1029-1058.
- Tovmasyan, A. K., 2008, Focal Mechanisms of Yerevan Earthquakes. The modern main issues of Geology and Geography, 297-305.
- Wang, Y. and Q. Deng, edited, 1988, Active fault system around Ordos Massif. The Research Group on “Active Fault System around Ordos Massif”, Beijing: State Seismology Bureau, 335p.
- Wells, D. L. and K. J. Coppersmith (1994) New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **84**, 974-1002.
- Xiano, H. and J. Suppe, 1992, Origin of rollover. *American Association of Petroleum Geologists Bull.* **76**, 509-529.

### Georisk 報告書

Report on the Garni Fault, 20p.

Report on the analysis of strong historical earthquakes located near to the ANPP (Armenian Nuclear Power Plant), 174-268.

Report on the Yerevan Fault, 43p.